

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



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU

Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie-Civil

Mémoire de fin d'études

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de
Master en Génie Civil

Option : STRUCTURE

Thème

ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN
MORTIER DE FIBRE DE VERRE (AR) CONSERVE DANS
UN MILIEU ACIDE

Etudié par : M^{elle} AGUERGOUR Karima

Encadreur : M^{me} AKMOUSSI

Maître de conférences UMMTO

Co-Encadreur : M^{me} KHELOUI

Maître de conférences UMMTO

Année universitaire : 2017/2018

Remerciements

*J'ai l'honneur d'être dirigé par Madame **AKMOUSSI**. Dans cette recherche. Qui a su me faire partager son savoir-faire et sa rigueur scientifique qui m'ont été très précieux pour la réalisation de ce travail. Je tiens à lui témoigner toute ma gratitude pour l'aide et le temps précieux qu'elle m'a apporté.*

*Mes remerciements les plus respectueux à Madame **KHELOUI** pour son aide et d'avoir accepté de faire partie dans ce travail. Ses idées, son soutien moral et qui répond toujours présente. Lorsque j'ai besoin de son aide dans les moments les plus difficiles dans ce mémoire.*

Je remercie également les membres du jury, je suis fier et très reconnaissante du grand honneur en acceptant de juger ce mémoire. Veuillez trouver ici l'expression de mon grand respect et de ma profonde et parfaite gratitude. Vos compétences font de vous une référence reconnue dans vos domaines.

J'exprime ensuite toute ma sympathie tout d'abord au directeur technique de la commune ainsi qu'à tous mes collègues de la direction de l'administration locale de la willaya de Tizi-Ouzou, pour leur soutien, leurs conseils et leur aide.

Je tiens à exprimer mes reconnaissances à ma famille qui m'offre toujours son soutien et son encouragement. Mes plus vifs remerciements vont également à tous mes amis.

Un grand merci à tous ceux qui sont toujours disponibles pour partager avec moi les moments difficiles et heureux.

SOMMAIRE

Résumé	
Remerciements	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	01

Chapitre 1 : BETON DE FIBRE DE VERRE

Introduction	04
1.1. Le béton de fibres	04
1.1.1. Le béton de fibres - Comment ?	04
1.1.2. Le béton de fibres - Pourquoi ?	04
1.1.3. Le béton de fibres- qu'apporte-t-il ?	05
1.2 Natures de fibres	05
1.2.1 Fibres naturelles : elles ont surtout 2 origines.....	05
A- Végétale	05
B-Minérale	05
1.2.2. Fibres artificielles	06
2. Les fibres de verre	07
2.1. Définition	07
2.2. Composition Chimique de quelques types de fibres de verre	08
2.3. Rôle de la nature des constituants : fibres et matrices.....	09
2.4. Procédés de fabrication	11
1.4. Classification des fibres de verre	12
1.4.1. Classification des fibres de verre suivant leur longueur	12
1.4.2. Classification des fibres suivant leur application.....	12
1.4. Propriétés des fibres de verre	13
1.5.1. Résistance chimique.....	13
1.5.2. Mécanisme de corrosion dans l'eau, le milieu acide et le milieu alcalin.....	13
2. Les propriétés mécaniques des bétons de fibre de verre	14
2.1. Comportement en flexion	14

2.2. Comportement en compression.....	18
Conclusion	20

Chapitre 2 : Mécanismes d'altération des bétons

Introduction	21
2.1. Réaction alcali-granulat.....	23
2.2. Carbonatation	24
2.3. L'attaque sulfatique.....	25
2.3.2. Les différentes catégories d'ettringite	26
a) L'ettringite de formation primaire	26
b) L'ettringite de formation secondaire.....	27
c) L'ettringite de formation différée.....	28
2.3.3. Mécanisme d'attaque	28
2.3.4. Conséquences du gonflement lié à l'ettringite	29
2.3.5. Facteurs influençant l'ettringite	30
2.4. L'attaque chimique.....	30
2.4.1. Les nitrates.....	30
2.4.2. Les sels d'ammonium.....	30
2.4.3. Les chlorures	31
2.4.4. Les oxalates	32
2.4.5. Les hydroxydes alcalins	32
2.4.6. Les phosphates	32
2.5. Attaque et action par l'eau de mer	32
1-Action des sulfates	34
2-Action des chlorures	34
3-Action du CO ₂	34
2.6. Lixiviation	35
2.6.1. Mécanisme	36
2.6.2. Conséquences générales.....	37
Conclusion.....	39

Chapitre 3 : Matériaux et procédure

Introduction	41
3.1 Matériaux utilisés	41
3.1.1 Ciment	41
3.1.2 Sable	41
3.1.3 L'eau de gâchage	42
3.1.4 Superplastifiant.....	42
3.1.5 Fibres.....	42
3.2 Composition des mortiers.....	43
3.3 Formulation des mortiers	43
3.3.1 Préparation de la gâchée.....	44
3.3.2 Conservation des éprouvettes.....	44
3.4 Essais sur mortiers.....	45
3.4.1 Essai de compression (NF P 18-406)	45
3.4.2 Essai de traction par flexion trois points (NF P 18-407)	46
Conclusion.....	46

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

Introduction	47
4.1 Présentation des résultats	47
4.2 Essai de résistance à la compression	47
4.2.1 Acide sulfurique	47
4.2.2 Sulfate d'ammonium	50
4.3 Essai de résistance à la flexion trois points	52
4.3.1 Acide sulfurique	52
4.3.2 Sulfate d'ammonium	54
Conclusion.....	55

Conclusion générale	56
----------------------------------	-----------

Bibliographie

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Compositions chimiques des différents types de fibres de verre	09
Tableau 1.2: Les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées (G.DEBICKI1987).....	10
Tableau 3.1: Composition minéralogique du ciment.....	41
Tableau 3.2 : Les caractéristiques du super plastifiant	42
Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres de verre.....	42
Tableau 3.4 : Composition d'un mortier témoin.....	43
Tableau 3.5 : Désignation des différentes éprouvettes	43

Liste des figures

Figure 1.2 : Les fibres naturelles [1].	06
Figure 1.2 : Les fibres artificielles [1].....	07
Figure 1.3 : Fibre de verre [4].	08
Figure 1.4 : Les relations contraintes–déformation des fibres de renforcement (G.DEBICKI1987).	11
Figure 1.5 : Distribution des contraintes en flexion pour un béton sans fibre et un béton avec fibres [12].	15
Figure 1.6 : Définition de l'indice de ténacité selon ASTM C 1018 et JCI SF4 [15].....	16
Figure 1.7 : Equation (A) confrontée avec les résultats d'essais (d'après R.N.Swamy).	17
Figure 1.8 : Résistance à la flexion du ciment armé de fibres de verre en fonction de la teneur en fibres (% du volume) et pour différentes longueurs de fibres.	17
Figure 1.9 : Flèche en fonction de la contrainte de flexion pour un ciment armé de fibres de verre (d'après R.N. Swamy).....	18
Figure 1.10 : Résistance en compression en fonction du pourcentage des fibres [21].	19
Figure 1.11 : Relation entre taux volumique de fibres de longueur variable et densité GRC à 28 jours [23].	19
Figure 2.1 : fissurations grossières dues à l'alcali – réaction (Entrée d'un tunnel) [26].....	23
Figure 2.2 : phénomène d'alcali réaction rencontré [27].	23
Figure 2.3: Détermination de la profondeur de carbonatation [28].	24
Figure 2.4 : Dégradation du béton par réaction sulfatique en pied de poteau [30].	25
Figure 2.5: Ettringite primaire non expansive dans la pâte de ciment, vue au microscope électronique à balayage.	27
Figure 2.6 : Ettringite secondaire non expansive dans un pore (1), vue au microscope électronique à balayage.....	27
Figure 2.7 : Ettringite expansive (1 et 2) au contact d'un granulat (3), vue au microscope électronique à balayage.....	28
Figure 2.8 : Pile de pont affectée par une réaction de gonflement interne due à la formation d'ettringite différée.....	29
Figure 2.9: Observation au MEB du gypse trouvé à la surface des éprouvettes immergées dans la solution du sulfate d'ammonium $(NH_4)_2SO_4$ [35].....	31
Figure 2.10: Quelques photos d'ouvrage en BA dégradés par l'eau de mer [39].	33

Figure 2.11: Schématisation des zones d'attaques du béton par l'eau de mer (zone immergée) [41].	35
Figure 2.12 : représentation schématique de la dégradation d'une pâte de ciment soumise à la lixiviation par une eau pure dé ionisée stabilisée à pH 7.	37
Figure 3.1: Sable normalisé.	41
Figure 3.2 : Les fibres de verre AR.	43
Figure 3.3 : Essai de compression.	45
Figure 3.4: Essai de flexion 3 points.	46
Figure 4.1 : Essai de compression sur éprouvettes non pré-fissurées	47
Figure 4.2 : Essai de compression sur éprouvettes pré-fissurées.	48
Figure 4.3 : Evolution de la résistance en fonction du taux en fibres.	49
Figure 4.4 : Evolution du module de Young en fonction du taux en fibres.	49
Figure 4.5 : Essai de compression sur éprouvettes non pré-fissurées	50
Figure 4.6 : Essai de compression sur éprouvettes pré-fissurées.	51
Figure 4.7: Evolution de la résistance en fonction du taux en fibres.	51
Figure 4.8 : Evolution du module de Young en fonction du taux en fibres.	52
Figure 4.9 : Essai de flexion sur éprouvettes non pré-fissurées.	53
Figure 4.10 : Essai de flexion sur éprouvettes pré-fissurées.	53
Figure 4.11 : Essai de flexion sur éprouvettes non pré-fissurées.	54
Figure 4.12 : Essai de flexion sur éprouvettes pré-fissurées.	55

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Les mortiers et les bétons ont connu un essor important ces dernières années dans tous les domaines à savoir: bâtiments, ouvrages d'arts, constructions spéciales..., 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... ».

Le béton est sous certaine condition particulières du milieu environnant, il peut être confronté à des environnements agressifs. Ces derniers peuvent changer certains facteurs physique et chimique et causer un danger significatif pour le béton.

Il est bien nécessaire de connaître les mécanismes de dégradation du béton dans différent milieu tel que la formation de l'acide sulfurique dans les réseaux d'assainissement, où les effluents riches en composés soufrés déclenchent une attaque acide sur les liants hydrauliques. Le dégagement d'hydrogène sulfuré (H_2S) produit dans ces réseaux d'assainissement, en milieu anaérobie à partir des composés du soufre contenus dans les effluents brassés ou circulant dans les ouvrages est un gaz fortement agressif. Les composés soufrés provenant des sulfates et des produits organiques sont de type protéine végétale et animale ou de type sulfonâtes contenus dans les produits détergents. La réduction de ces composés est due à l'action de bactéries anaérobies sulfato-réductrices, nécessitant un milieu pauvre en oxygène ($O_2 < 0.1$ mg /l) par consommation de l'hydrogène sulfuré au cour de leur métabolisme, les sulfo-bactéries forme cette acide sulfurique.

Quand le pH de la surface du béton est voisin du 4, les Thiobacillithiooxidantes peuvent se développer et métaboliser de l'acide sulfurique. Ce dernier, dont la concentration dans le bio film peut être importante, provoque la transformation en gypse de la chaux issue de l'hydratation du ciment, mais aussi des hydrates eux-mêmes et à une réaction sulfatique qui conduit à la formation d'ettringite expansive. Cela se traduit par des pertes d'épaisseurs (de l'ordre de 2 à 3 mm par année) pouvant mettre en danger l'intégrité de la structure. Les cycles d'immersion-séchage accroissent le degré d'altération.

Ces mécanismes d'attaques acide et sulfatique peuvent se décrire de la manière suivante :

- Attaque acide : dissolution de la chaux hydratée avec formation de gypse

- Attaque sulfatique : réaction entre les aluminates du ciment et le gypse pour former de l'ettringite.

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 préalable 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 par des fibres. Il s'agit du béton de fibre composé d'une matrice cimentaire et des fibres de verre.

L'application la plus largement ré pondue est l'emploi des fibres de verre riche en zirconium (ZrO_2) (fibre alcali- résistant ou Cem fil) dans la matrice cimentaire afin d'éliminer l'alcalinité et d'avoir un béton-mortier résistant au milieu alcalin ainsi que constituer une solution définitive à la dégradation du comportement mécanique des composites cimentaires.

OBJECTIF

L'objectif principal de cette étude est de présenter les expérimentations primordiales qui seront utilisés pour évaluer la durabilité des mortiers liée à la nature de son environnement.

Les caractéristiques du mortier fibré sont évaluées en fonction du pourcentage d'incorporation des fibres de verre AR conservé dans un milieu agressive. En considérant comme moyen de caractérisation : les résistances mécaniques (compression, flexion).

Des éprouvettes seront exposées aux différents milieux de conservation chimiquement agressifs : acide sulfurique (H_2SO_4) et le sulfate d'ammonium ((NH_4SO_4)).

Il s'agit donc d'aboutir à la confection d'un mortier à base d'un renfort alcali résistant à la dégradation chimique.

LE BUT

Le but de ce travail est d'étudier le comportement mécanique des mortiers avec différents pourcentages en fibres de verre conservés dans les milieux agressifs suivants : acide sulfurique et sulfate d'ammonium.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur le béton fibré, ces différents constituants et ces caractéristiques mécaniques.
- Le deuxième chapitre présente les différents mécanismes d'altération du béton.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons la composition du mortier étudié et les essais mécaniques réalisés.

- Les résultats des essais mécaniques obtenus sont présentés au quatrième chapitre.
- Nous terminons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous rappelons les différents résultats obtenus et quelques perspectives à poursuivre ultérieurement.

Chapitre 1

Béton de fibres de verre

Introduction

Le béton reste un matériau moderne. En effet, il a de nombreuses qualités, parmi lesquelles on peut citer son faible coût, sa facilité de moulage ou de projection pour se prêter à diverses conceptions, son excellente résistance en compression, sa grande rigidité, sa faible conductivité thermique, sa bonne tenue au feu et sa durabilité. Toutefois, sa faible résistance en traction et sa fragilité font que le béton doit être renforcé. Ainsi, on utilise des armatures et des câbles ou des fils de précontraintes.

Ces solutions traditionnelles ont fait leurs preuves et elles resteront utilisées encore très longtemps. Malgré cela, il existe une autre solution qui consiste à noyer dans le béton, des éléments résistant à la traction : des fibres qui sont naturelles ou synthétiques. Cela conduit à un matériau composite. Si, en général, les fibres sont noyées au hasard dans le béton, il arrive que, par des mises en œuvre adaptées, on puisse donner aux fibres une orientation préférentielle correspondant à la direction des contraintes pour améliorer la résistance à la traction ou à la flexion d'une pièce.

Les différentes recherches effectuées jusqu'à présent, et les premières applications font espérer que le béton de fibres permettra la fabrication d'éléments plus mince et résistants mieux à la fissuration.

1.1. Le béton de fibres**1.1.1. Le béton de fibres - Comment ?**

Pour qu'il y ait réellement béton de fibres, mélange ciment granulats eau et fibres il faut répondre à un certain nombre d'exigences.

- Béton de qualité répondant aux exigences habituelles de béton classique ; la jonction de fibres ne permet pas, à priori d'améliorer les performances du béton.
- liaison étroite entre les fibres et le béton pour assurer l'ancrage.
- Bonne répartition des fibres dans le béton.

1.1.2. Le béton de fibres - Pourquoi ?

Le comportement particulier du béton de fibres permet de :

- Prendre en compte la résistance à la traction directe ; en effet la rupture , si elle est atteinte, n'est plus brutale , par ailleurs on peut déterminer des moments de fissurations et de rupture permettant l'approche de dimensionnement des ouvrages en maîtrisant le risque de fissuration et risque de rupture.
- Mobiliser une résistance au cisaillement importante.

- Améliorer le comportement au jeune âge.
- Avoir une résistance à la flexion identique sous l'application d'efforts égaux, mais de sens opposés (symétrie de comportement).
- Réduire considérablement les effets du retrait ou des chocs thermiques.
- Avoir une bonne résistance à la fatigue et aux chocs.

De plus les bétons de fibres ont l'avantage de se prêter à toutes les techniques de mise en œuvre : coulage, pompage, moulage et projection.

1.1.3. Le béton de fibres- qu'apporte-t-il ?

Le béton non armé est un matériau fragile, sous des efforts excessifs de traction ou de traction par flexion la rupture se produit brutalement par élargissement rapide d'une fissure, sans avertissement puisque la déformation reste très faible. (De l'ordre 1/1000).

Si dans ce béton existe un réseau de fibres, il va s'opposer, et ce d'autant qu'il est plus dense, à l'élargissement de la fissure. Là où les premières fibres rencontrées effectuant une couture de la fissure jusqu'à en bloquer l'évolution.

Si les efforts excessifs persistent d'autres fissures vont se former qui seront à leur tour cousues par d'autres fibres.

Ainsi l'évolution incontrôlée de fissures est empêchée font que le béton de fibres présente une certaine ductilité (capacité à la déformation), ténacité (résistance à la fatigue), résilience (résistance aux chocs).

1.2 Natures de fibres

Les fibres peuvent se classer en deux catégories : les fibres naturelles et les fibres artificielles.

1.2.1 Fibres naturelles : elles ont surtout 2 origines

A- Végétale : on peut citer le Sisal (fibres extraites de l'agave) et le coir (fibres de Coco). Ils ont été utilisés sur les chantiers expérimentaux dans certains pays en voie de développement. Le Sisal est très résistant mais putrescible, par contre le coir est imputrescible.

B-Minérale : ce sont surtout les fibres d'amiante, ce matériau connu depuis de nombreuses années possède beaucoup d'avantages :

- faible coût ;

- forte résistance,
- module élevé ;
- bonne tenue au feu et bonne compatibilité avec ciment.

Toutefois, ces fibres ne conviennent pas pour les mortiers et les bétons à cause de leur longueur trop faible et de la quantité d'eau importante exigée. Elles ne sont donc utilisées qu'avec de la pâte pure.

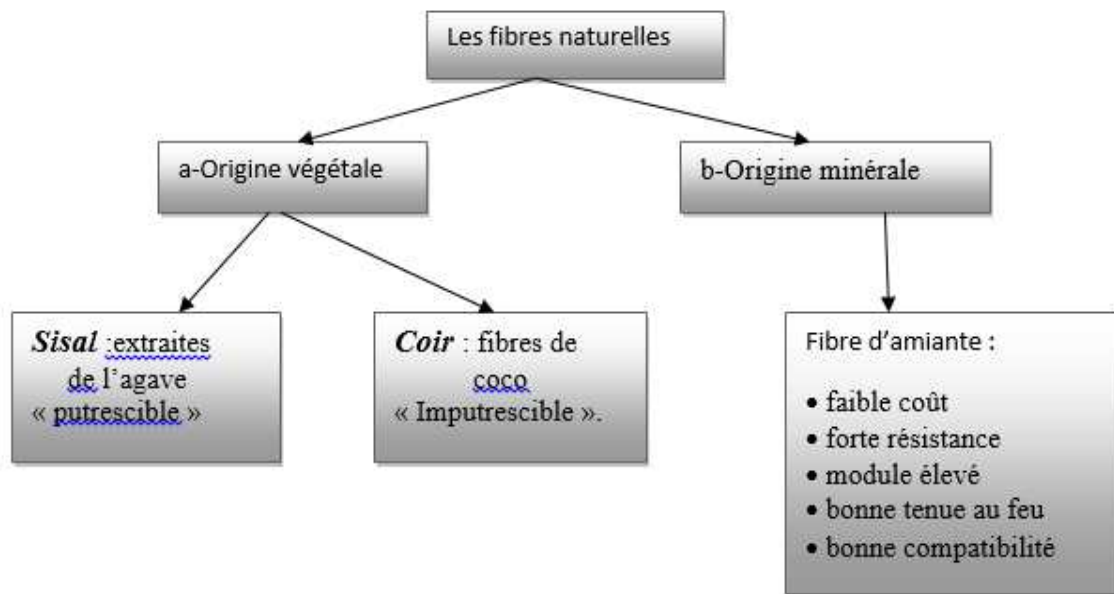


Figure 1.1 : Les fibres naturelles [1].

1.2.2. Fibres artificielles

On distingue deux types: les fibres minérales et fibres organiques. Parmi la première catégorie, on trouve les fibres métalliques (acier, fonte) les fibres en carbone, en céramique et en verre. Parmi les fibres organiques les plus courantes ce sont les polypropylènes et plus rarement les polyamides et les polyesters.

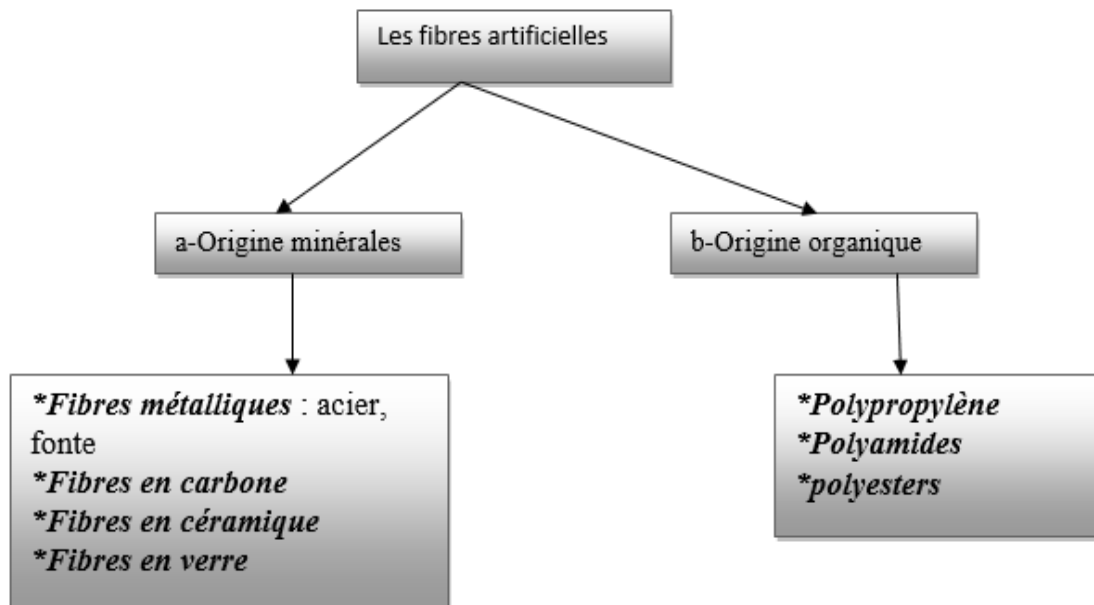


Figure 1.2 : Les fibres artificielles [1].

Dans notre travail on s'intéresse à l'étude du comportement du mortier de fibre de verre dans le milieu acide et sa résistance à la compression et à la flexion.

2. Les fibres de verre

2.1. Définition

Les fibres de verre sont fabriquées à partir d'un mélange à base de silice. En faisant varier la composition de ce mélange, différents types de verre peuvent être obtenus: le verre E, les verres S ou R pour des applications mécaniques plus sévères, le verre C pour des applications chimiques et le verre D pour des applications diélectriques. Rappelons que les fibres de verre E constituent le principal renfort des produits composites de grande diffusion et sont utilisés dans plus de 95% des matériaux composites.

Le mélange est porté à fusion à 1200°C puis est transféré dans un four filière à 1000°C.

En sortie de filière, le verre est étiré à grande vitesse pour former des fibres continues dont le diamètre varie de 10 à 50 μm . Les fibres ainsi produites ne peuvent pas être utilisées sous cette forme en raison de plusieurs points faibles : manque de cohésion inter-filamentaire, forte sensibilité à l'abrasion, présence de charges électrostatiques et mauvaise compatibilité avec la résine (imprégnation, adhérence verre/ résine). Pour toutes ces raisons et dans le but d'être tissées, les fibres sont ensuite ensimées. Il existe trois principaux types d'ensimages :

- L'ensimage textile“ pour permettre le tissage. Il fait intervenir des agents collants, lubrifiants, adoucissants ou encore antistatiques.

- L'ensimage plastique“ ou “finish“ qui consiste à déposer un agent de pontage rendant possible la liaison fibre/résine.

- L'ensimage textilo- plastique“ qui confère aux fibres les propriétés nécessaires au tissage et à la liaison fibre/résine en une seule étape [2].

Les fibres de verre sont considérées actuellement comme étant le renfort le plus utilisé dans la réalisation des composites. Ce type de fibre présente des caractéristiques distinctives à savoir:

Une excellente adhérence, grâce aux ensimages appropriés, à la plupart des matrices organiques. Des bonnes propriétés diélectriques. Rapport caractéristiques mécaniques et un prix intéressant [3].



Figure 1.3 : Fibre de verre [4].

2.2. Composition Chimique de quelques types de fibres de verre

Les constituants de base pour la fabrication du verre sont les mêmes que ceux utilisés pour le verre. Les cinq oxydes essentiels qui rentrent dans le mélange sont les suivants : CaO, MgO, Al₂O₃, B₂O₃, SiO₂. Les autres oxydes ne sont ajoutés que dans le but d'améliorer certaines propriétés telles que la viscosité, la durabilité chimique et les propriétés mécaniques, ou pour fabriquer des fibres destinées à usages beaucoup plus appropriés, comme leur application dans le nucléaire, l'électronique, la télécommunication ou les matériaux composites.

La composition chimique de la fibre de verre, dépend des conditions d'utilisation (chimiques et mécaniques). Chaque domaine d'utilisation exige une composition bien spécifique, tableau (1.1).

Tableau 1.1 : Compositions chimiques des différents types de fibres de verre [3] et [5]

Oxydes % massique	Types de Fibres de verre								
	AR	E	C	A	R	S	D	Rezal	Cemfil
SiO ₂	61	53-54	60-65	70	60	62-65	73-74	60	62
Al ₂ O ₃	-	14-15.5	2-6	2.5	25	20-25	0.5	5	0.8
CaO	5	-	14	9	6	-	-	10	5.6
MgO	-	20-24	1-3	0.9	9	10-15	0.5-0.6	-	-
B ₂ O ₃	-	6.5-9	2-7	0.5	-	0-1.2	22-23	-	-
Na ₂ O	17	-	8-10	12.5	-	0-11	1.3	5	14.8
ZrO ₂	10	-	-	-	-	-	-	5	16.7
FeO ₃	0.3	-	0.5	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1

Concernant les fibres de verre AR (Alcali-Résistante), Elles ont été développées spécialement pour le renforcement des mortiers à base de ciment. Elles ont pour particularité d'avoir une teneur élevée en oxyde de zirconium et en soude. Le zirconium se concentre à la surface des fibres et leur confère une bonne résistance aux composés alcalins générés lors de la prise [6]. Le renforcement du ciment avec ces fibres lui donne une meilleure résistance à la corrosion acide [7]. Les autres fibres nécessitent un traitement par des résines [8].

2.3. Rôle de la nature des constituants : fibres et matrices

Les fibres sont non seulement caractérisées par leur forme mais aussi par leur nature dont dépendent les grandeurs suivantes : coefficient de dilatation, résistance mécanique, souplesse, éventuellement plasticité, déformation à rupture, adhésion plus ou moins importante à la pâte de ciment et neutralité vis à vis de ce milieu.

Le tableau (1.2) donne les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées. Pour compléter ce tableau, et positionner les fibres les unes par rapport aux autres en mettant en évidence leur caractère fragile ou ductile, la figure (1.4) présente les relations contrainte-déformation des différents types de fibres.

Tableau 1.2: Les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées (G.DEBICKI1987).

Fibres	Diamètre (mm)	longueur	Masse volumique (kg/cm ³)	Résistance traction MPa	Module MPa	Allongement (%)	Coefficient de dilatation 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	Résistance au feu °C
Amiante	0.0002 à 0.002	5 à 20	2.6 à 3	300 à 1000	80 000 à 150 000	/	2 à 3	1500
Polypropylène	0.01 à 0.1	25 à 75	0.9	400 à 600	4000 à 8000	15 à 20	90	150
Verre (au zirconium)	0.006 à 0.020	40 à 70	2.6	1500 à 3000	80 000	2 à 3	9	600
Acier	0.2 à 0.5	20 à 50	7.9	1000 à 3000	200 000	3 à 4	11	1500
Carbonne	0.005 à 0.01	variable	2	2000	400 000	0.5	1	400 à 1500
Fonte amorphe	30 à 60 x 0.03 x1	30 à 60	7.2	2500	130 000	2	/	300
Aramide	0.12	10	1.4	2800	80 000	4.2	-2	300

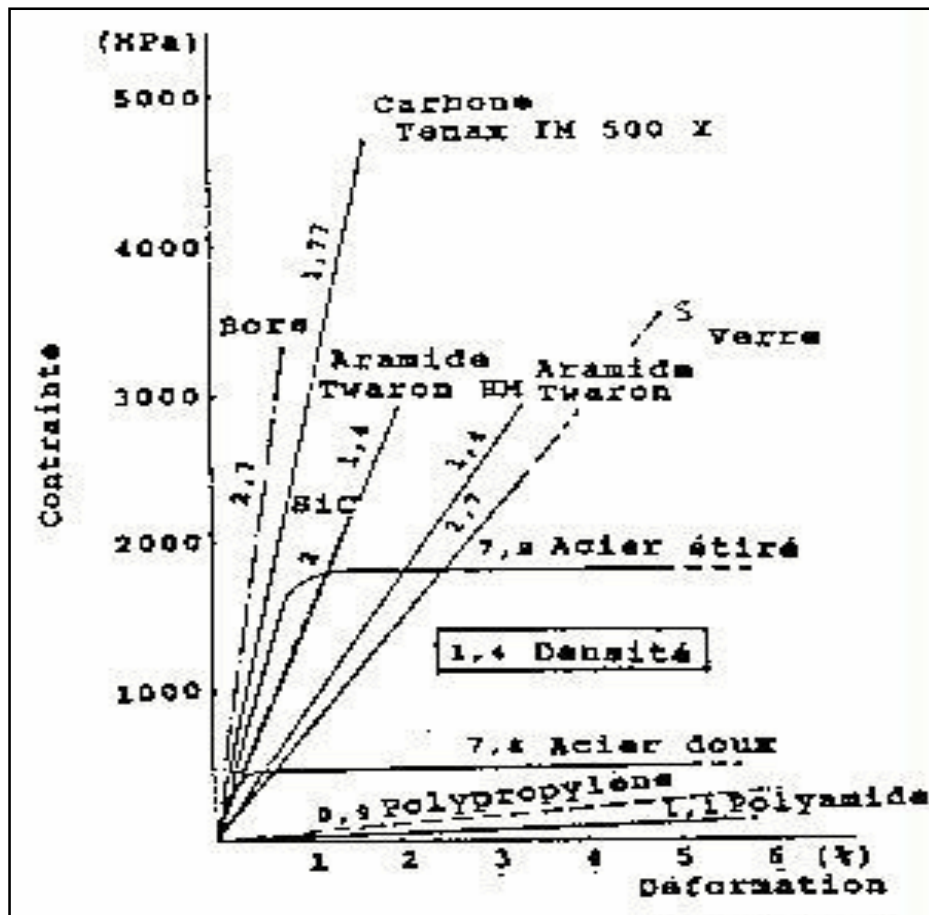


Figure 1.4 : Les relations contraintes–déformation des fibres de renforcement (G.DEBICKI1987).

2.4. Procédés de fabrication

L'élaboration des fibres de verre comprend trois étapes principales: le fibrage, l'étirage et l'ensimage.

- Le fibrage: A la sortie du four (1550°C), le verre s'écoule par gravité à travers des filières chauffées (1250°C) en alliage de platine et de rhodium. Il en ressort à l'état plastique, est ensuite étiré à grande vitesse, puis refroidi pour former des filaments de 5 à 25 micromètres de diamètre.
- L'étirage:
 - Mécanique par filage à grande vitesse (55 à 60 m/s), qui donne un fil de base continu de 50 à 1500 filaments plus ou moins fins, appelés «sillionnes».
 - pneumatique, qui produit une mèche de fibres discontinue (longueur comprise entre 5 et 80cm) appelée «verranne».
- L'ensimage: C'est une dispersion aqueuse déposée sur les filaments qui assure plusieurs fonctions:

- Lier les filaments entre eux pour former des fils,
- Lubrifier les filaments pour faciliter les tissages ultérieurs,
- Protéger l'intégrité physique de la fibre durant les manipulations,
- Eliminer les charges électrostatiques,
- Permettre la compatibilité verre-résine en qualité d'agent de couplage dans les composites
- Pour se lier chimiquement à une matrice organique [9].

L'ensimage est très important car le verre est très sensible aux manipulations. Ces dernières sont susceptibles d'induire des défauts de surface et de diminuer la résistance mécanique des fibres. L'ensimage des filaments comporte également un agent de couplage capable d'augmenter l'adhésion entre la fibre et une matrice polymère. La fibre de verre est un constituant fortement flexible compte tenu de son petit diamètre et de son faible module d'Young. Les fibres de verre ont un rapport prix / performances mécaniques intéressant, une dilatation et une conductivité thermique faibles. Certaines fibres, comme la fibre de verre R, ont une haute résistance mécanique. En revanche, leur module d'élasticité est généralement faible comparé à ceux des fibres de carbone, aramides ou céramiques. De plus, les fibres de verre ont tendance à vieillir au contact de l'eau [9].

I.4. Classification des fibres de verre

Les fibres de verre peuvent être classées vis-à-vis de plusieurs facteurs, parmi ces classements on cite les suivants:

1.4.1. Classification des fibres de verre suivant leur longueur

- a) Fibres continues : appelées aussi fibres textiles, leur longueur peut atteindre plusieurs centaines de mètres et leur diamètre est d'une moyenne de 12 μ m.
- b) Fibres courtes: leur diamètre varie de 0.5 à 30 μ m et leur longueur est de quelques centimètres, ces fibres sont utilisées dans l'industrie textile et pour l'isolation [3].

1.4.2. Classification des fibres suivant leur application

Parmi les différents types de fibres on peut citer les fibres destinées aux usages suivants

- a) fibres pour l'isolation électrique.
- b) fibres pour l'isolation acoustique.
- c) fibres pour l'isolation thermique.

- d) fibres pour la fabrication des filtres
- e) fibres pour le renforcement des plastiques et des liants minéraux [3].

1.5. Propriétés des fibres de verre

Vue les multitudes compositions chimiques, de traitements thermiques, les fibres de verre présentent plusieurs propriétés, soient chimiques ou mécaniques.

1.5.1. Résistance chimique

Les verres, constitués d'éléments sous leur forme oxydée, sont peu réactifs chimiquement, contrairement aux métaux qui ont tendance à s'oxyder. Cette inertie chimique des verres leur permet ainsi d'être employés comme emballages alimentaire sou pharmaceutiques. Toutefois, les verres réagissent avec les solutions aqueuses courantes, mais avec une vitesse faible et leur composition est ajustée de telle sorte qu'ils puissent être employés sans risque, dans des conditions données.

Dans des solutions aqueuses acides (hors acide fluorhydrique), le phénomène prépondérant est l'échange d'ions Na^+ du verre avec les ions H^+ de la solution. La réaction d'échange pour se poursuivre doit progresser au sein du verre par un processus de diffusion ce qui entraîne une diminution de la vitesse de réaction avec le temps. Un verre moyennement soluble dans les acides perd environ 20 mg par dm^2 de surface après 6 heures dans HCl , 6mol. L^{-1} , à l'ébullition. Par contre, dans des solutions aqueuses basiques, l'attaque du verre se produit par rupture des liaisons Si-O et passage de l'élément silicium en solution. La vitesse de réaction reste constante au cours du temps. Ce processus d'attaque rend compte de la résistance moindre d'un verre courant dans les milieux basiques. Un verre moyennement soluble dans les bases perd environ 100 mg par dm^2 de surface après 3 heures dans NaOH , 1mol. L^{-1} , à l'ébullition [10].

La corrosion aqueuse d'un verre dépend, entre autre, de son organisation à courte distance est communément admise. Rappelons que les unités structurales fondamentales des verres silicatés sont des tétraèdres, organisés en réseau plus ou moins polymérisé [11].

1.5.2. Mécanisme de corrosion dans l'eau, le milieu acide et le milieu alcalin

La corrosion des verres par des solutions aqueuses peut se dérouler selon différents procédés :

- dissolution sélective conduisant à la formation d'une couche superficielle résiduelle, elle même plus ou moins soluble, après lessivage des éléments les plus mobiles.
- Dissolution totale de verre continuellement exposé à la corrosion. Ce dernier mécanisme, bien établi en milieux neutres et acides pour les verres phosphatés ne paraît jouer, en dehors des pH très alcalins, qu'un rôle négligeable pour les verres silicatés utilisés en fibrage.
- Réaction avec la solution pouvant amener la nucléation et la croissance de phases solides pouvant être intégrées au micro profil d'altération superficielle.

La corrosion des verres est sous la dépendance de leur composition, exprimée en constituants « Modificateurs » [sodium (Na), potassium(K), calcium(Ca) etc] et « formateurs » [silicium (Si), bore (B)...] du «réseau vitreux». Certains éléments, comme l'aluminium (Al), peuvent jouer les deux rôles selon leur concentration. Schématiquement, le bore et les « modificateurs» sont dissous sélectivement tandis que la couche résiduelle silicatée concentre l'aluminium et, le cas échéant, d'autres éléments comme le fer (Fe) et le zirconium (Zr) [11].

En milieux acides, la dissolution d'un verre ternaire simple ($\text{Na}_2\text{O CaO SiO}_2$) peut être décrite par deux mécanismes successifs ayant chacun sa propre cinétique. Un échange ionique sélectif initialement rapide libère des ions Na^+ et Ca^{++} en laissant une couche résiduelle de silice hydratée qui est ensuite totalement dissoute. Le premier mécanisme (attaque du verre frais par des ions étant ralenti par le transport diffusionnel au travers de la couche superficielle alors que le second a une vitesse à peu près constante. Ce scénario, éventuellement compliqué par la précipitation de phases secondaires mettant en jeu une couche résiduelle silice alumineuse ou de nature plus complexe, est transposable à la plupart des verres silicates [11].

2. Les propriétés mécaniques des bétons de fibre de verre

2.1. Comportement en flexion

Après apparition des fissures, l'état de contrainte schématisant le comportement en flexion d'une poutre en ciment composé de verre (ccv) se traduit par un déplacement de fibre neutre vers la zone comprimée donnant ainsi une distribution de contrainte non linéaire (figure 1.5). En zone de traction. Les contraintes ne sont plus proportionnelles aux déformations. Les bonnes performances obtenues par un essai de flexion pourraient amener

une mauvaise interprétation et faire attribuer à la résistance mécanique ce qui est dû à la déformabilité mécanique du matériau.

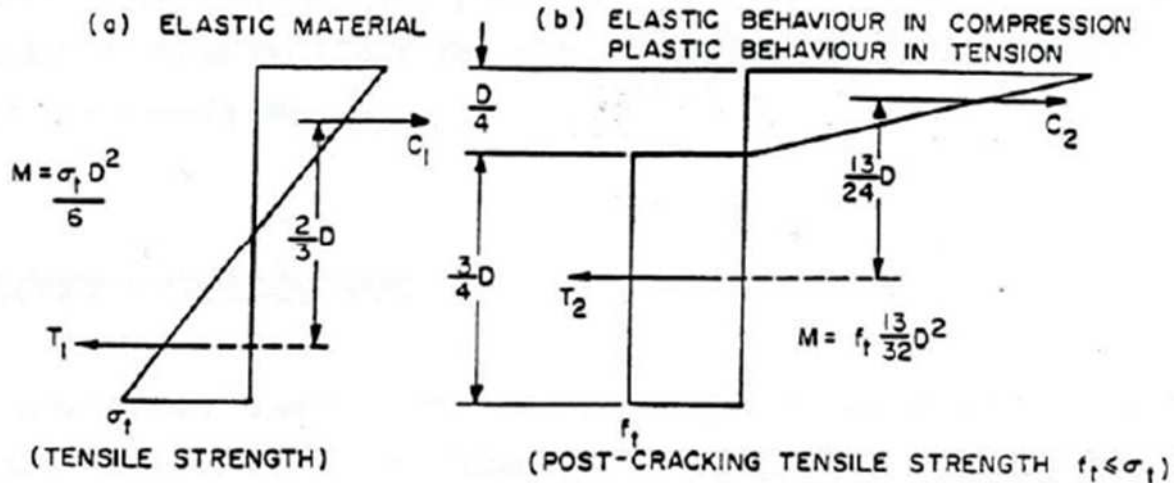


Figure 1.5 : Distribution des contraintes en flexion pour un béton sans fibre et un béton avec fibres [12].

Les caractéristiques mécaniques les plus importantes des composites ciment-verre sont à déduire d'un essai de flexion où la longueur, la nature et la teneur en fibre sont étroitement liées à ces caractéristiques et par conséquent conduisent à l'augmentation de la résistance, de la résistance à la fissuration et de la ténacité [13] qui a été quantifiée par différents chercheurs.

Selon la norme américaine ASTM C 1018 [14]. L'indice de ténacité est défini comme étant un rapport entre deux surfaces sous la courbe charge- déformation. La norme américaine donne trois indices de ténacité I5, I10 et I20 et trois critères de déformation $3\delta_f$, $5.5\delta_f$ et $10.5\delta_f$ où δ_f est la déformation du matériau correspond à la 1ère fissure (déformation en phase linéaire). un exemple de calcul des indices de ténacités et des critères de déformation sont représentés dans la figure I.8.[15]

L'essai d'ASTM C 1018 a fait l'objet de nombreuses critiques [16] parce qu'il dépend excessivement de la définition de la première fissure et la courbe charge-déplacement peut avoir une zone d'instabilité. Cette formation de première fissure devient souvent difficile à localiser. Malgré de telle critique, cet essai reste toujours le plus répandu pour mesurer la ténacité, figure (1.6).

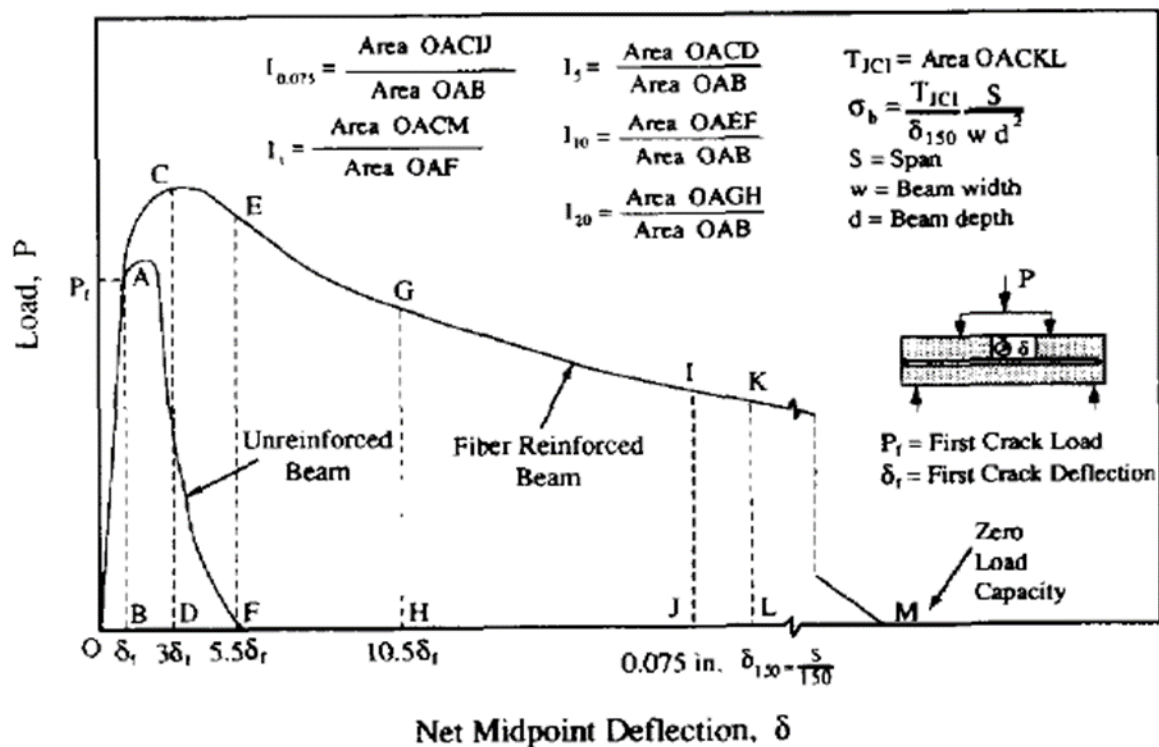


Figure 1.6 : Définition de l'indice de ténacité selon ASTM C 1018 et JCI SF4 [16].

Des essais des spécimens renforcés de fibre de verre et d'autres fibres ont mis en évidence la performance de la distribution spatiale des fibres par l'amélioration des indices de ténacité surtout lorsque les fibres sont concentrés dans la zone tendue [17].

En fait, les fibres augmentent le travail nécessaire pour propager une fissure et atteindre la rupture telle que décrite par la mécanique de la rupture [18]. De ce fait les fibres augmentent la ductilité du composite cimentaire, c'est-à-dire ses caractéristique on post-fissuration.

L'augmentation de la résistance en flexion du béton de fibre est beaucoup plus importante, elle peut atteindre 200 % et plus. Elle est due à la déformabilité du matériau. Il y a un déplacement de l'axe neutre durant la flexion.

Swamy [19] a rassemblé les résultats de divers expérimentateurs et propose une formule de régression qui donne la résistance à la flexion du béton de fibre σ_c fonction de celle du béton sans fibre σ_m :

$$\sigma_c = 0,97 \sigma_m (1-V_f) + 3,41 V_f l/d$$

avec :

V_f : étant le pourcentage, en volume des fibres

l/d : étant l'élanement des fibres (figure 1.7)

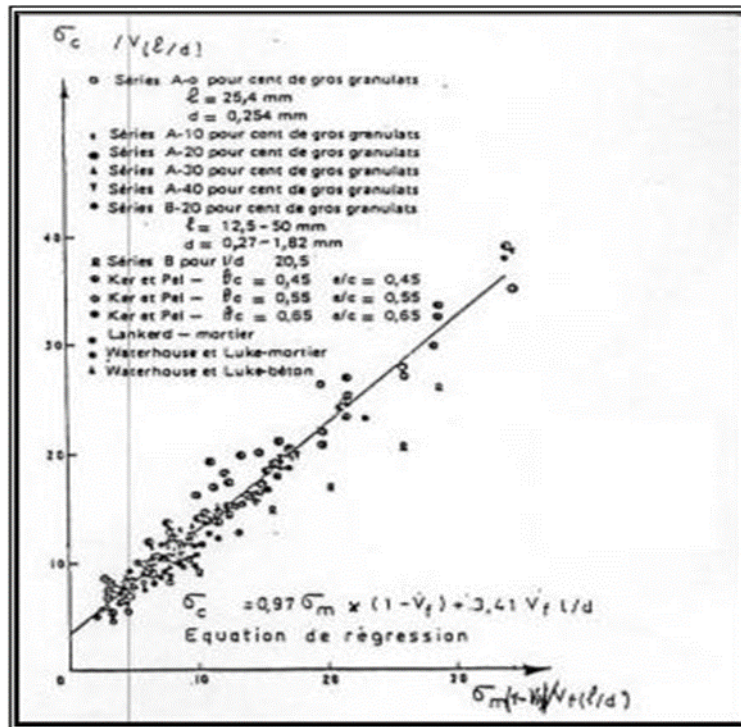


Figure 1.7 :Equation (A) confrontée avec les résultats d’essais (d’après R.N.Swamy).

Avec des fibres de verre Majumdar [20] a trouvé des résultats intéressants (figure 1.8).

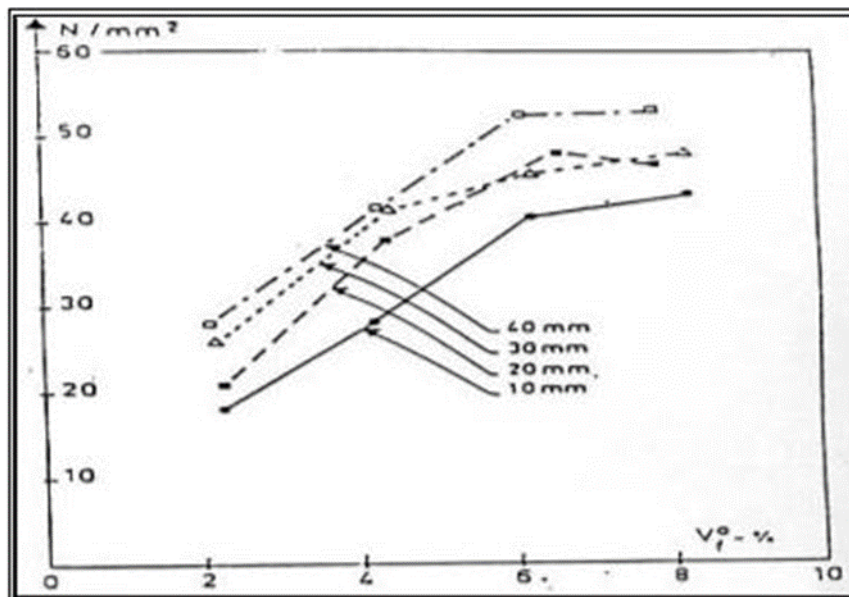


Figure 1.8 : Résistance à la flexion du ciment armé de fibres de verre en fonction de la teneur en fibres (% du volume) et pour différentes longueurs de fibres.

Avec les fibres de verre, la résistance des bétons à la flexion augmente de plus en plus selon son pourcentage dans le béton et selon sa longueur.

Swamy [20] a étudié les diagrammes charges-flèche et contrainte-flèche en flexion centrée. Les courbes sont reportées sur la figure (1.9).

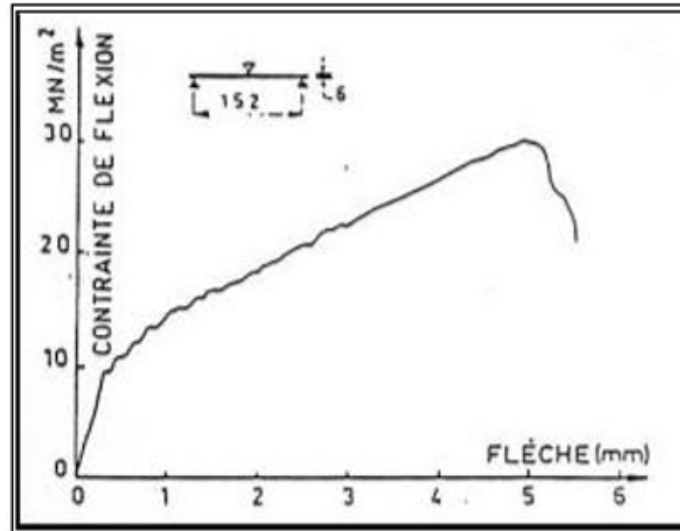


Figure 1.9 : Flèche en fonction de la contrainte de flexion pour un ciment armé de fibres de verre (d'après R.N. Swamy).

2.2. Comportement en compression

De façon général, l'incorporation de fibre n'apporte pas d'amélioration sensible en compression comme la montre la figure (1.10) [21]. Pour le composite ciment-verre le constat est le même [22], du fait que les fibres de verre vont introduire une hétérogénéité supplémentaire dans le composite. Cette hétérogénéité entraîne une diminution de la compacité (diminution de la masse volumique) figure (1.11) se traduit par une légère chute des propriétés. L'augmentation de porosité entraîne la difficulté de mise en œuvre et cette conséquence s'aggrave en présence des fibres longues et des taux très élevés.

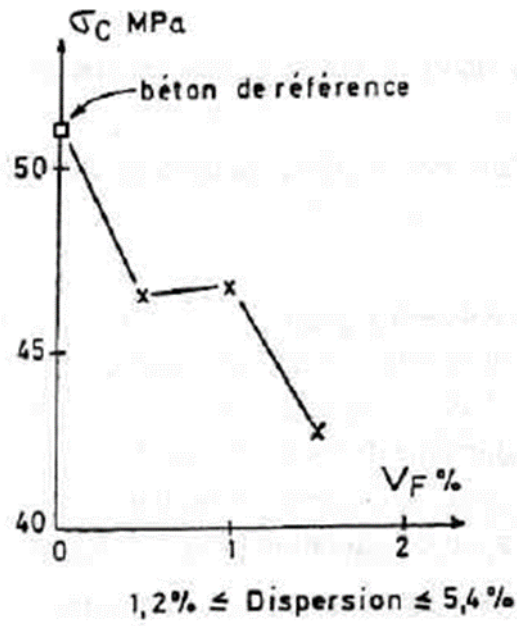


Figure 1.10 : Résistance en compression en fonction du pourcentage des fibres [21].

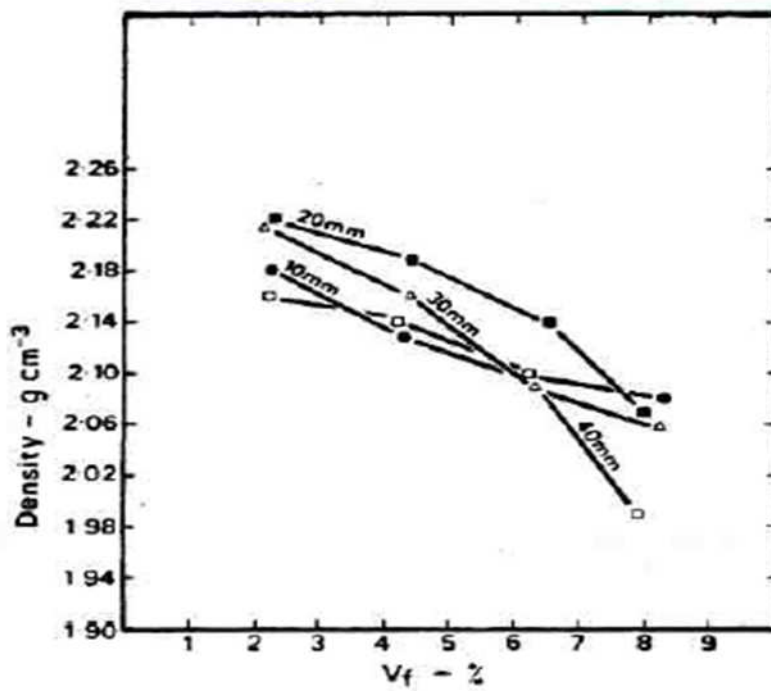


Figure 1.11 : Relation entre taux volumique de fibres de longueur variable et densité GRC à 28 jours [23].

Conclusion :

Par les différentes littératures consulter, nous avons donnés une idée sur les raisons qui nous a guidé dans le choix des matériaux à utiliser et dans la définition des essais à effectuer afin d'amélioré nos connaissances sur l'utilisation des mortiers de fibres de verre dans l'environnement.

Ce qui peut être retenu que les fibres de verre permet d'amélioré sous certaines conditions les caractéristiques du matériau utilisé à l'état initial du mortier. Ainsi d'améliorer le comportement du mortier et cela dans le but de limiter le développement des fissures et d'augmenter et assurer la durabilité des mortiers et des bétons en générale.

Chapitre 2

*Mécanismes d'altération
des bétons*

Introduction

Bâtir a toujours été l'un des premiers soucis de l'homme et l'une de ses occupations majeurs. A ce jour, la construction connaît un grand essor dans la plus part des pays, et très nombreux sont les professionnelles qui se livrent à cette activité.

Cependant, si le métier de construire a une grande importance pour l'homme, la durabilité des ouvrages constitue l'une de ces préoccupations essentielles dans la conception, la réalisation ou l'entretien des ouvrages de génie civil ; car les ouvrages en béton sont conçus et construits pour durer.

La durabilité est une propriété de génie du béton, qui détermine la durée de service des structures en béton de manière significative. En raison de l'interaction du béton avec des influences externes, les propriétés mécaniques et physiques du béton peuvent être menacées.

Parmi les facteurs menaçants l'attaque des produits chimiques tels que les acides qui sont nocifs pour le béton.

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation - c'est-à-dire sa stabilité - était d'apprécier par sa résistance à la compression. Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

L'attaque chimique constitue un sujet d'importance croissante, en raison de la propagation des dommages des structures en béton dans les zones urbaines et industrielles. Bien que le ciment Portland ordinaire est le plus couramment utilisé dans la construction d'infrastructures, sa résistance aux attaques chimiques, tels que les sulfates est un sujet préoccupant de plus en plus à travers tout le monde.

Les altérations observées sont d'ordre chimique ou physique. Les agents chimiquement agressifs peuvent être classés en quatre catégories.

· Les gaz, d'origine naturelle où résultent de pollutions atmosphérique ;

Les liquides inorganiques ou organiques qui, indépendamment de leurs éventuels effets purement physiques, agissent surtout par leur caractère acide ou basique, et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir :

- Les solides essentiellement des sols et déchets d'origines diverses ;
- Les milieux biologiques, fermentations bactériennes aérobies ou anaérobies.

L'agression chimique entraîne presque toujours la dissolution de la chaux contenue dans la pâte de ciment, mais l'attaque des silicates et aluminates de chaux hydratés ne sont pas négligeables. Si les produits de réactions sont solubles, la matrice devient de plus en plus

ouverte, la perméabilité augmente et la résistance de surface chimique diminue progressivement.

Au contraire, si les produits de réactions sont insolubles, deux cas peuvent se présenter suivant que la nouvelle phase est ou non expansive. Si les nouveaux cristaux ne sont pas ou sont très faiblement expansifs, ils comblent progressivement la porosité des bétons et ainsi diminuent la perméabilité et augmentent la durabilité.

Lorsque la nouvelle formation est expansive, elle induit des pressions plus élevées que la résistance à la rupture.

Par conséquent, les informations et les données sur le principe, les facteurs et les mesures de protection des matériaux à base de ciment contre ces attaques sont utiles. En d'autres termes La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons. Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Après une présentation sommaire du ciment Portland et de ses composés, on décrira le moteur de l'hydratation qui est l'évolution chimique du ciment dans l'eau et les caractéristiques des produits formés au cours de ces réactions. On montrera comment la microstructure de la pâte de ciment durcie se construit par l'hydratation. Il y est question de l'hydratation du ciment Portland, constituant de base de la plupart des bétons de structure, de la stabilité des produits d'hydratation dans différents milieux et des outils d'optimisation pour décrire l'évolution de la composition chimique du matériau dans un environnement donné.

Puis, on parlera des pathologies dues aux attaques chimiques à savoir :

- Réaction alcali-granulat;
- la carbonatation ;
- l'attaque sulfatique ;
- attaque chimique ;
- attaque et action par l'eau de mer,
- lixiviation ;
- Les cycles de gel- dégel

2.1. Réaction alcali-granulat

La réaction alcali silice est une pathologie des bétons qui se caractérise par une réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle. Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement d'ouvrages atteints qui entraînent la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton. Ces phénomènes sont préoccupants pour les gestionnaires des structures atteintes car ils mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages.

De plus, il n'existe aucun moyen d'arrêter la réaction. Ainsi la prédiction de l'évolution du gonflement et des dégradations des ouvrages atteints et l'évaluation de l'efficacité et de périodicité des opérations d'entretien sont des points cruciaux [24], [25] voir figure 2.1 et figure 2.2

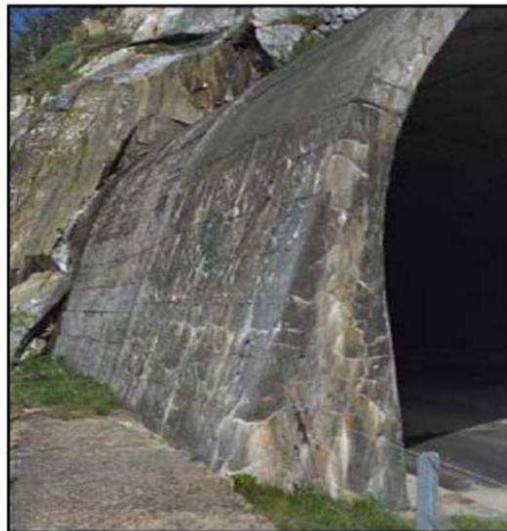


Figure 2.1 :fissurations grossières dues à l'alcali – réaction (Entrée d'un tunnel) [26].



Figure 2.2 : phénomène d'alcali réaction rencontré [27].

Il existe trois types de réactions alcali granulats:

La réaction alcali carbonate: elle implique des granulats contenant des inclusions argileuses, le mécanisme de gonflement est lié à l'absorption d'eau des argiles.

- La réaction alcali silicate: elle est semblable à la réaction alcali silice mais de cinétique plus lente, elle est très rare
- La réaction alcali silice: il s'agit de la plus courante, surtout si l'environnement est fortement humide et la teneur en alcalis du béton est élevée.

2.2. Carbonatation

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Elle correspond à une transformation progressive d'essentiellement, un des composants des bétons durcis, la portlandite et la calcite, au contact du dioxyde de carbone contenu dans l'air et en présence d'humidité (figure II.3) selon l'équation bilan suivante :



Cette transformation s'accompagne d'une diminution de pH (le béton sain à un pH d'environ 13), ce qui constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier et permet la formation d'une couche d'oxydes passifs. Le pH d'un béton carbonaté est d'environ 9. A ces valeurs de pH, le film passif est détruit et la corrosion peut se développer à l'intérieure et provoque le vieillissement de béton.

On peut déterminer la profondeur de carbonatation par l'essai de phénophtaléine (indicateur coloré). La pulvérisation de cet indicateur, virant au rose vif lorsque le pH est supérieur à 9, permet de mettre en évidence le front carbonatation du béton (toutes les zones qui restent incolores sont carbonatées).



Figure 2.3: Détermination de la profondeur de carbonatation [28].

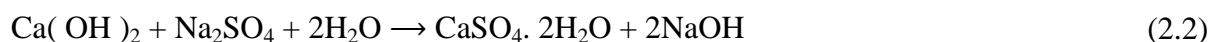
2.3. L'attaque sulfatique

L'attaque sulfatique est provoquée par l'action des sulfates provenant du milieu extérieur (eaux souterraines, remblais contenant des sulfates, conduits d'évacuation, pluies acides), avec la chaux et les aluminates du ciment. Cette réaction conduit à la formation d'ettringite secondaire, également appelée sel de Candlot ou trisulfoaluminate de calcium. Lorsqu'ils sont produits en quantité importante, ces sels à caractère expansif conduisent à un gonflement du béton et à sa fissuration. Les fissures produites sont généralement assez fines et surtout sont organisées en un réseau de mailles, on parle de faïençage figure 2.4. Les travaux de recherches présentés par F. X. Deloye [29] ont bien définis la chaîne de réactions chimiques aboutissant à la formation d'ettringite.



Figure 2.4 : Dégradation du béton par réaction sulfatique en pied de poteau [30].

Deux mécanismes principaux sont mis en jeu, Le premier au passage en solution (lixiviation) des ions calcium de l'hydroxyde de calcium, Ca(OH)_2 , et des C-S-H. Il est parfois sous-estimé, du processus de dégradation dont la conséquence est un accroissement de la porosité du matériau qui se traduit par l'augmentation de la perméabilité et de la diffusivité qui accélère le transfert des ions agressifs dans le matériau. Ce premier mécanisme peut être schématisé par les réactions qui se produisent avec le sulfate de sodium :



Les deux réactions conduisent à la libération des ions Ca^{2+} et à la formation de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Les ions calcium des C-S-H, dont le rapport C/S diminue, passent progressivement en solution, le terme ultime de la réaction étant un gel de silice hydraté.

Le second mécanisme, en relation avec le premier, correspond à la formation de sels tels que l'ettringite, trisulfoaluminate de calcium hydraté ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). La précipitation de ce sel, peut conduire à des gonflements et des fissurations plus ou moins importantes du béton. Elle résulte de la réaction du gypse plus ou moins dissocié en ions SO_4^{2-} et Ca^{2+} , avec les aluminates de calcium du liant.

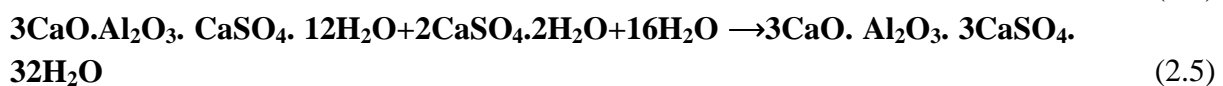
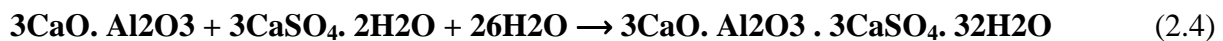
-Aluminates anhydres, essentiellement l'aluminate tricalcique C_3A .

-Alumino-ferrite tétracalcique C_4AF .

-Aluminates hydratés de type C_4AH_13 .

-Monosulfoaluminate de calcium $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$.

Les réactions avec le C_3A et avec le monosulfoaluminate peuvent s'écrire :



Toutes ces réactions, qui se produisent à l'échelle microscopique, se traduisent sur l'ouvrage par l'endommagement du béton, la formation de fissures plus ou moins importantes et des pertes de raideur et de résistances mécaniques. L'accroissement de la perméabilité dû à la fissuration du matériau peut accélérer les dégradations.

La dégradation des ouvrages en bétons qui ont été en contact avec des solutions plus concentrées en sulfate peuvent ne pas être aussi bien différenciés, mais le mécanisme reste globalement le même. [31] (THESE DOCTORAT MME FEDAOUI).

2.3.2. Les différentes catégories d'ettringite

On distingue trois types d'ettringite qui peuvent coexister dans un même béton, elles se différencient par les conditions de leur formation.

a) l'ettringite de formation primaire (Figure 2.5) : correspond à un produit issu de l'hydratation des ciments qui se forme par réaction entre le régulateur de prise (gypse, hémihydrate, anhydrite) et les aluminates de calcium. Ces cristaux, de forme aciculaire, ne provoquent pas de gonflement car ils cristallisent avant le durcissement du béton, dans les espaces libres du matériau.

Ils revêtent même un caractère bénéfique, puisqu'ils contribuent à la cohésion de la pâte de ciment au jeune âge, leur formation étant accompagnée par une diminution de la porosité et par une augmentation concomitante de la résistance mécanique du mélange.



Figure 2.5: Ettringite primaire non expansive dans la pâte de ciment, vue au microscope électronique à balayage.

b) L'ettringite de formation secondaire (Figure 2.6) correspond à une ettringite qui cristallise dans le béton durci, à la faveur de circulation d'eau dans les bétons (phénomènes de dissolution/recristallisation) et de sources de sulfates externes (sols, milieu marin...) ou internes (quantités trop importantes de sulfates dans les constituants du béton). Cette ettringite peut générer des gonflements internes pouvant conduire à l'apparition de désordres sur les ouvrages. Dans le cas des phénomènes de dissolution/recristallisation, elle cristallise sous forme aciculaire dans les espaces libres du béton (pores, fissures, interfaces pâte-granulats) à partir de la solution interstitielle ou à la faveur de percolation d'eau dans le matériau poreux ou fissuré, et ne présente généralement pas de caractère expansif. En revanche, l'ettringite de formation secondaire consécutive à un apport externe ou interne de sulfates, est susceptible de générer des gonflements internes principalement attribués aux pressions de cristallisation.

Contrairement aux faciès non expansifs, cette ettringite pathologique cristallise sous une forme massive et comprimée. [32]



Figure 2.6 : Ettringite secondaire non expansive dans un pore (1), vue au microscope électronique à balayage.

c) L'**ettringite de formation différée** (Figure 2.7) concerne uniquement des bétons ayant subi, au jeune âge, une augmentation de température supérieure à 65-70 °C, température au-delà de laquelle l'ettringite de formation primaire ne peut se former au cours des réactions d'hydratation du ciment et/ou est décomposée.

De telles conditions de température peuvent se produire au cours de traitements par étuvage ou dans le cas de pièces massives en béton. Par la suite, des cristaux d'ettringite peuvent se former, après retour à température ambiante et en présence d'humidité, dans le béton durci, et sont ainsi susceptibles de provoquer des pressions de gonflement conduisant à des phénomènes d'expansion. [32]

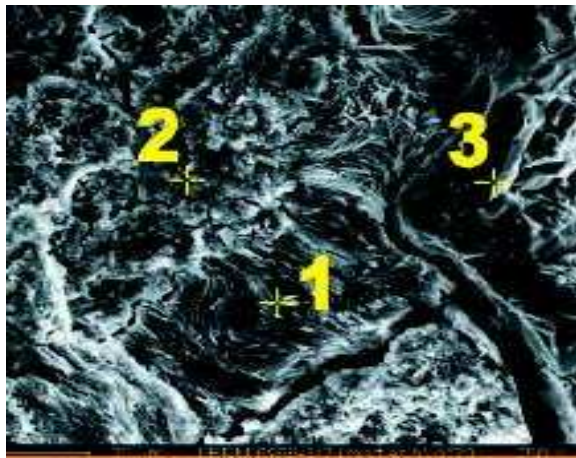


Figure 2.7 : Ettringite expansive (1 et 2) au contact d'un granulat (3), vue au microscope électronique à balayage.

2.3.3. Mécanisme d'attaque

La formation d'ettringite produite par l'attaque du sulfate de calcium survient dans la pâte de ciment durci provoque une expansion destructrice, qui fait encore l'objet de controverses entre deux principales écoles de pensée MATHER et plusieurs autres chercheurs pensent que la réaction entre le sulfate de calcium et le C_3A est topochemique, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une réaction à l'état solide ne supposant pas une mise en solution suivie d'une reprecipitation qui permettrait le mouvement du produit nouvellement formé loin de son site de formation. Un tel mouvement ne résulterait pas d'une pression. Si le volume du produit de la réaction topochemique occupe un volume supérieur à celui des deux composés originaux, les forces expansives destructrices se développent. Dans la réaction entre le sulfate de calcium et le $Ca(OH)_2$, il n'y a pas d'augmentation du volume global, mais en raison de la différence de solubilité du C_3A et du gypse.

La seconde école, dont MEHTA est le principal chef de file, attribue le développement des forces expansives à la pression de gonflement provoquée par l'adsorption d'eau par

L'ettringite colloïdale originelle qui précipite dans la solution en présence de chaux. Donc ils pensent que la formation de l'ettringite en elle-même est la cause de l'expansion. Malgré tout, l'expansion amplifie significativement dans des conditions d'humidité, de sorte qu'il est probable que les deux mécanismes décrits précédemment soient concernés à différentes étapes (neville) [32].

2.3.4. Conséquences du gonflement lié à l'ettringite

Les désordres consécutifs aux pressions de gonflement liées à la formation d'ettringite correspondent à des phénomènes de fissuration multidirectionnelle peu différents de ceux observés dans le cas des phénomènes d'alcali-réaction. Cette fissuration peut diminuer la capacité portante des ouvrages. Les conséquences de l'attaque par les sulfates provoquent aussi une chute de résistance du béton due à une perte de cohésion de la pâte de ciment hydraté et à une désagrégation entre la pâte et les granulats. La dégradation s'effectue progressivement du parement vers le cœur des éléments, jusqu'à ce que le béton devienne friable ou, parfois même se désintègre.

En revanche, dans le cas d'une formation d'ettringite liée à une source interne de sulfates (ettringite différée ou réserve excessive en sulfates dans les constituants du béton), la dégradation affecte la masse des éléments en béton (réaction de gonflement interne), conduisant ainsi à des désordres plus préoccupants et plus sévères. Enfin, les désordres sur ouvrages peuvent, d'une part, apparaître au bout de quelques mois ou de quelques années en fonction du contexte environnant. Et d'autre part, la présence d'une fissuration en parement est susceptible d'accélérer l'apparition d'autres phénomènes pathologiques tels que la corrosion des armatures, par exemple. [32]

La figure 2.8 montre un gonflement interne du à la formation d'ettringite.



Figure 2.8 : Pile de pont affectée par une réaction de gonflement interne due à la formation d'ettringite différée.

2.3.5. Facteurs influençant l'ettringite

La formation d'ettringite est très dépendante de la teneur en aluminates de calcium et de la quantité de chaux disponible, cette dernière ayant une influence significative sur la solubilité de l'ettringite. En conséquence, la nature du ciment est une condition essentielle à la limitation du risque de formation d'ettringite expansive, donc la limitation de l'attaque sulfatique consiste à utiliser un ciment ayant un faible pourcentage de C_3A , c'est-à-dire un ciment portland résistant aux sulfates, ou réduire la quantité de $Ca(OH)_2$ dans la pâte de ciment hydraté en utilisant un ciment à base de laitier de haut fourneau de pouzzolane. Ces mesures préventives sont utiles, mais il est encore plus important de prévenir la pénétration de sulfates dans le béton : on y parvient en confectionnant un béton aussi dense que possible dont la perméabilité est aussi faible que possible [32].

2.4. L'ATTAQUE CHIMIQUE

2.4.1. Les nitrates

Sauf dans le cas des nitrates d'ammonium et d'aluminium, ces sels sont peu agressifs. Ils agissent principalement par échange de base suivant la réaction schématique :



Où X est le cation associé à l'ion nitrate. La formation d'un sel de calcium soluble au détriment de la chaux des C-S-H et de la portlandite, entraîne une dégradation plus ou moins importante de ces hydrates [33] (THESE DOCTORAT MME FEDAOUD).

2.4.2. Les sels d'ammonium

Nitrate, chlorure, acétate, phosphate et sulfate, sont très agressifs et réagissent suivant un mécanisme d'échange de base $2NH_4Ca$ illustré par la réaction suivante relative au nitrate d'ammonium présent dans les engrais :



La réaction conduit à la formation de nitrate de calcium très soluble et à un dégagement gazeux d'ammoniac. La réduction de basicité due au dégagement d'ammoniac empêche la réaction d'atteindre l'équilibre. La conséquence est un lessivage progressif de la chaux de la portlandite et des C-S-H qui peut conduire à une dégradation des propriétés mécaniques du béton. La réaction avec les aluminates conduit à la formation d'un nitro-

aluminates de calcium $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [34] (THESE DOCTORAT MME FEDAOUI)..

Le chlorure d'ammonium CINH_4 , qui donne lieu à la formation de chlorure de calcium très soluble, est déjà agressif aux concentrations de 15 à 30 mg/L. Son mécanisme d'action est voisin de celui du nitrate d'ammonium. La formation de chloroaluminates de calcium $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ est également possible.

Le sulfate d'ammonium, agressif par l'ion ammonium et par l'ion sulfate, donne naissance au gypse $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ qui, par réaction avec les aluminates peut conduire à la formation d'ettringite délétère (figure 2.9) [33] (THESE DOCTORAT MME FEDAOUI).

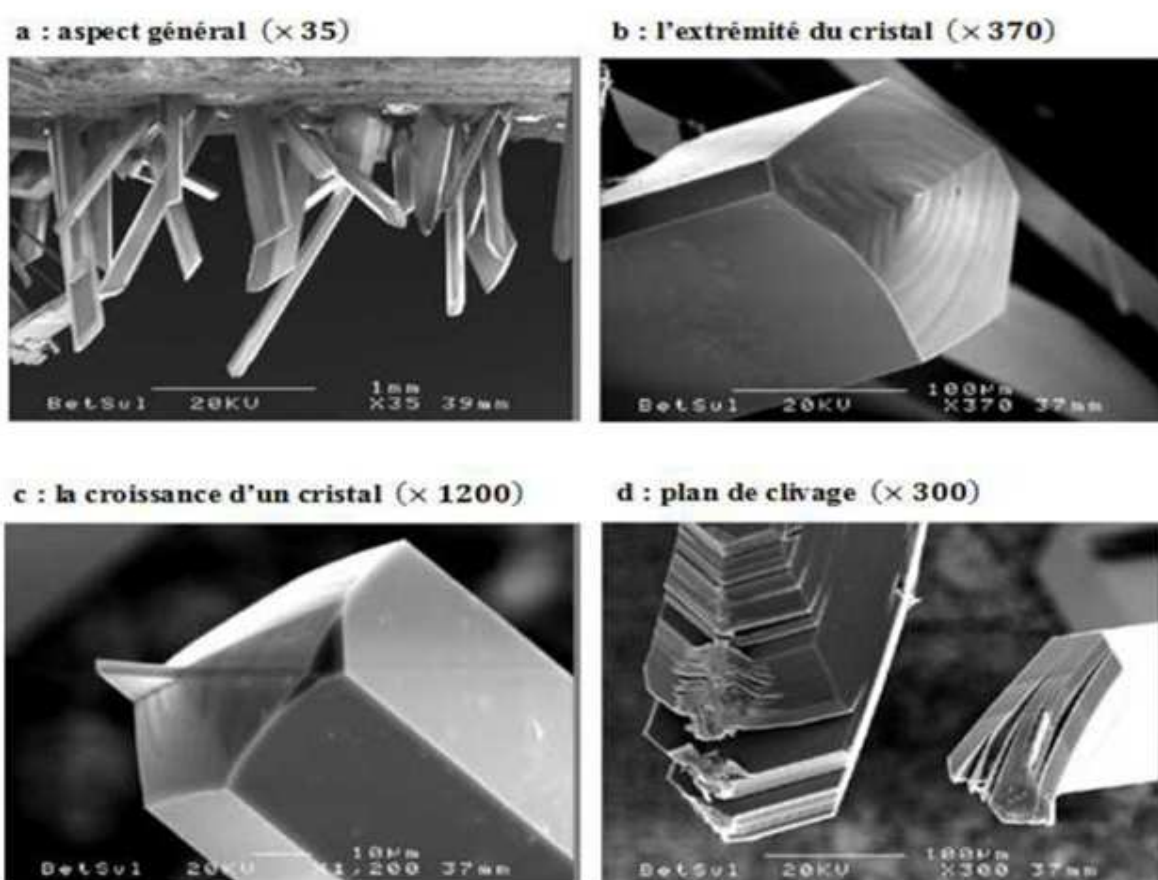


Figure 2.9: Observation au MEB du gypse trouvé à la surface des éprouvettes immergées dans la solution du sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ [35].

2.4.3. Les chlorures

Indépendamment de leur effet bien connu sur la corrosion des aciers, et excepté le chlorure d'ammonium très agressif, ils peuvent être légèrement agressifs vis-à-vis du béton s'ils sont en forte concentration. Les travaux de Smolczyk [36] ont montré que des bétons de ciment Portland immergés dans des solutions concentrées de MgCl_2 et de CaCl_2 pouvaient être détruits par formation d'oxychlorures (par exemple, oxychlorure de magnésium

3MgO.MgCl₂.11H₂O), les bétons à base de ciment de laitier étant résistants dans les mêmes conditions. Les mêmes bétons conservés dans des solutions de chlorure de potassium demeurent intacts.

Les différences de comportement entre chlorures dépendent du coefficient de diffusion des ions Cl⁻, lui-même en relation avec le type de cation auquel ils sont liés. Elles dépendent également du coefficient de diffusion des cations olvatés.

Les mécanismes de dégradation mis en jeu sont essentiellement les suivants :

- dans le cas des chlorures de sodium et potassium : lixiviation du calcium de la portlandite et des C-S-H et formation de monochloroaluminate de calcium ;
- dans le cas des chlorures de calcium et de magnésium : lixiviation du calcium de la portlandite et des C-S-H et formation d'oxychlorures expansifs [36] accompagnés de brucite Mg(OH)₂ et de monochloroaluminate de calcium dans le cas de MgCl₂ [33].

2.4.4. Les oxalates

Ils forment également des sels insolubles et n'attaquent pas le béton.

2.4.5. Les hydroxydes alcalins

Les solutions à 10 % d'hydroxyde de potassium, de sodium ou d'ammoniac ne sont pas agressives vis-à-vis du béton de ciment Portland. Toutefois, l'accumulation par évaporation de sels sur la face opposée à la face en contact avec la solution peut provoquer des dégradations par écaillage ou desquamation. Le risque est faible pour les bétons compacts imperméables [37].

2.4.6. Les phosphates

Hormis les phosphates d'ammonium, forment avec la chaux des sels insolubles et sont peu ou pas agressifs.

2.5. Attaque et action par l'eau de mer

L'eau de mer est intrinsèquement un milieu modérément agressif chimiquement. Toutefois, dans les zones de marnage et d'aspersion, soumises aux cycles d'humidification/séchage ainsi qu'aux effets mécaniques des vagues, le milieu doit être considéré comme fortement agressif. [38]

L'eau de mer est constituée de sels chargés en ions chlorures de composés sulfatiques contenant les ions sulfates (SO₄²⁻), etc. Ces ions sont nocifs au béton lorsqu'ils pénètrent en son sein.

La grande particularité de l'eau de mer est que les proportions relatives de ses constituants sont sensiblement constantes (c'est-à-dire indépendante de la salinité (teneur en sels dissous)).

La salinité moyenne de l'eau de mer est 35g/l. Le pH de l'eau de mer est proche de 8,2. Les gaz dissous comprennent principalement : 64% d'azotes, 34% d'oxygène ; 1,8% de dioxyde de carbone (soit 60 fois la proportion de ce gaz dans l'atmosphère terrestre) (Figure 2.10) [39].



Figure 2.10: Quelques photos d'ouvrage en BA dégradés par l'eau de mer [39].

La durabilité en milieu marin est fonction d'un nombre relativement important de paramètres.

- Paramètres chimiques (ions agressifs).
- Paramètres géométriques (marées et fluctuation du niveau de la mer).
- Paramètres physiques (cycle de gel dégel, activation par les hautes températures).
- Paramètres mécaniques (abrasion).

Un béton bien formulé et bien mûris possède généralement une très bonne durabilité face à l'eau de mer. Les différents types d'attaques ont de la localisation préférentielle qui progressent vers l'intérieur du béton illustré par la figure (2.11) [40].

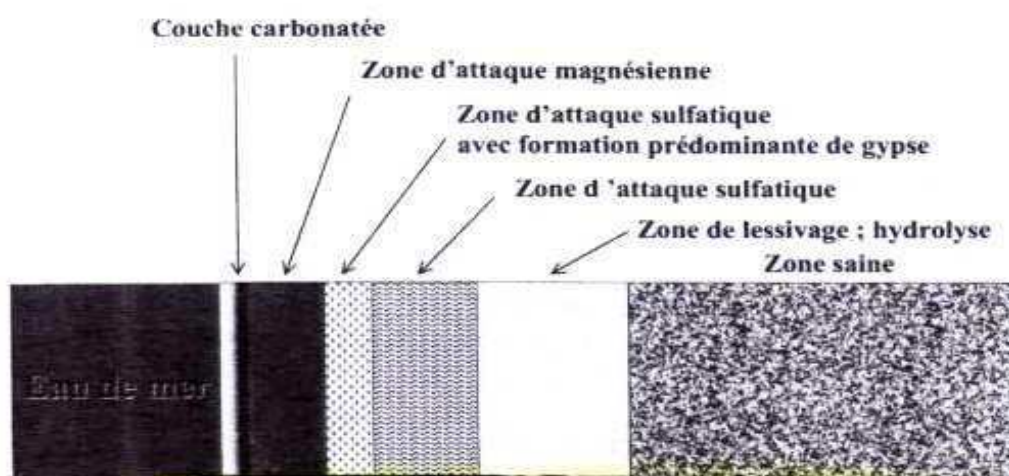


Figure 2.11: Schématisation des zones d'attaques du béton par l'eau de mer (zone immergée) [41].

2.6. Lixiviation

La phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé. Si le béton se trouve au contact d'une eau douce, très peu chargée en ions, et donc de pH plus faible que celui de la solution interstitielle, la pâte de ciment durcie se trouve en déséquilibre avec ce milieu. On constate alors une lixiviation progressive des hydrates se traduisant par une décalcification de la pâte : dissolution de la portlandite et attaque progressive des C-S-H. Ce phénomène est lent (quelque centimètre pour plusieurs centaines d'années) et ne pose problème que dans le cas où le béton est potentiellement au contact permanent de l'eau douce.

La lixiviation entraîne une variation très importante de la porosité et donc une variation forte des propriétés de transfert, notamment la diffusivité. Les propriétés mécaniques sont également affectées : on constate par exemple que la résistance à la

compression chute fortement. Les autres propriétés mécaniques comme le module d'élasticité et la résistance en flexion sont aussi affectées.

Les cinétiques de dégradation sont très variables et dépendent en particulier du matériau et de l'environnement aqueux. Par exemple, F. Badoux rapporte que, pour des durées d'exposition et un environnement agressif comparables (53 et 66 ans), les couches superficielles dégradées du barrage de Saint Etienne du Vigan et de l'écluse de Krembs ont pour épaisseur respectives 6 à 8 mm d'une part, et 1 à 3 mm d'autre part. Cet écart est imputé aux ciments utilisés, un CEM I/CPA pour le barrage et un CEM II/CPJ pour l'écluse. Y. Fujiwara a montré que la présence d'ions dissous dans l'eau modifie aussi fortement les cinétiques de dégradation de bétons enfouis dans un sol. En effet, certains de ces bétons, âgés de 60 à 100 ans, ont été dégradés sur quelques centimètres en présence d'une eau saline, soit des épaisseurs dix fois plus importantes qu'en eau douce.

Des études précédentes ont mis en évidence une dissolution progressive des principaux hydrates : d'abord la portlandite, qui est l'hydrate le plus soluble, puis le monosulfoaluminate de calcium, et enfin l'ettringite. Après que la portlandite soit totalement dissoute, les C-S-H se décalcifient jusqu'à former, dans l'état ultime de dégradation un gel de silice.

La variation de porosité (et donc des autres caractéristiques) dépend notamment de la quantité de portlandite présente. L'utilisation d'un ciment aux cendres volantes ou l'ajout de fumée de silice, en réduisant la quantité de portlandite, permet en général d'améliorer la résistance à la lixiviation et de réduire la chute de résistance. Un rapport eau/liant plus bas permet également de diminuer la vitesse de lixiviation. [42]

2.6.1. Mécanisme

En ce qui concerne le béton on parle plus généralement de lixiviation qui, dans sa définition première, est une opération qui consiste à faire passer lentement un solvant à travers un matériau en couche épaisse afin d'en extraire un ou plusieurs constituants solubles. C'est le terme souvent employé pour décrire le phénomène d'extraction progressive des ions calcium (dissolution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et décalcification des C-S-H) lors de la percolation des solutions agressives dans le béton. La lixiviation peut être décrite comme une dissolution progressive résultant d'une succession d'états d'équilibre entre les hydrates et la solution : au fur et à mesure que les ions agressifs arrivent au contact des hydrates, l'équilibre entre ces hydrates et la solution interstitielle est rompu ; mais il est aussitôt rétabli par une nouvelle dissolution des hydrates et/ou par la précipitation d'un nouveau composé selon que la solution est sous-saturée ou sursaturée par rapport à ce composé. Le terme de « lessivage » parfois

employé, a un sens analogue. Les composés précipités peuvent être nocifs ou non vis-à-vis de la durabilité du béton. [38]

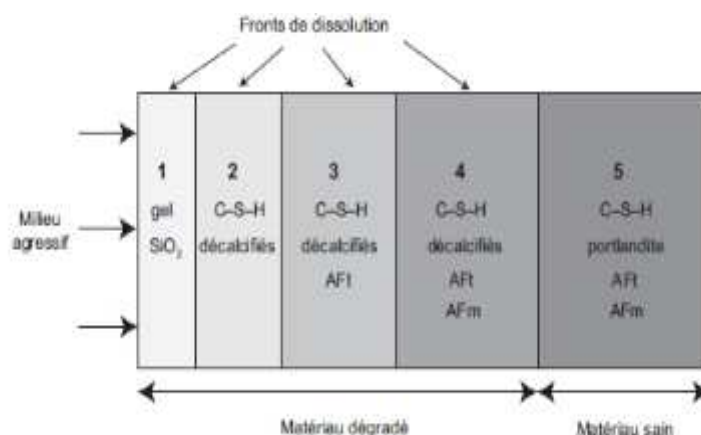


Figure 2.12 : représentation schématique de la dégradation d'une pâte de ciment soumise à la lixiviation par une eau pure déionisée stabilisée à pH 7.

Zone 1 : solubilisation totale des hydrates $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mono et trisulfoaluminates ; lixiviation totale du calcium des C-S-H et formation d'un gel résiduel de silice hydratée très peu soluble; zones 2, 3 et 4: solubilisation totale de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, décalcification progressive des C-S-H et solubilisation des phases AFm (monosulfoaluminates) d'abord, puis des phases AFt (trisulfoaluminates) ; Zone 5 = matériau non dégradé. [38]

2.6.2. Conséquences générales

La dissolution des hydrates, accompagnée ou non de la précipitation de composés nouveaux, a deux effets majeurs :

- D'une part, un accroissement de la porosité du béton qui a pour conséquence une augmentation de sa perméabilité et de sa diffusivité. L'augmentation de porosité se traduit également par une dégradation plus ou moins importante des caractéristiques mécaniques : module d'young, résistances;
- D'autre part, selon la nature, la solubilité et les conditions de précipitation des composés néoformés, un gonflement et une fissuration plus ou moins importants du matériau : ce peut être le cas, par exemple, de l'ettringite due à une agression par des sulfates d'origine externe.

L'agressivité des eaux naturelles dépend :

- Du pH (compris entre 4 et 6,5 suivant les cas) ;
- De la teneur en dioxyde de carbone agressif ;
- De la dureté ou titre hydrotimétrique (principalement $[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]$) ;
- De la mobilité du milieu agressif.

Le processus d'altération correspond essentiellement à la lixiviation des ions Ca^{2+} de la portlandite $Ca(OH)_2$ et des silicates de calcium hydratés C-S-H (accompagnée de la dissolution plus tardive des phases AFm et AFt). Il conduit à une augmentation de la porosité et, dans les cas les plus graves, à la dégradation des propriétés mécaniques du matériau [38].

Conclusion

La durabilité d'un béton n'est pas une de ses caractéristiques, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi, la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement.

Cependant, la durabilité du béton peut être affectée non seulement par son environnement, mais aussi par les caractéristiques du matériau telles que la perméabilité, la teneur en ciment, la nature des hydrates formés lors de l'hydratation du ciment.

Les propriétés du béton ont une influence directe sur la durabilité de l'ouvrage facteurs liés à la conception de l'ouvrage.

Un béton durable est un béton compact (présentant une faible porosité) dont les constituants de qualité ont été bien choisis conformément aux normes. Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents extérieurs.

Le béton est un système chimique fortement basique, évolutif, plus ou moins réactif au contact du milieu extérieur souvent plus « acide » (atmosphère, eaux, solutions salines, acides). Le béton est un solide poreux, qui renferme dans ses pores une solution interstitielle enrichie en alcalis dont le pH varie de 12,5 à 13,5. Le système chimique du béton, avec son pH élevé, est presque toujours en déséquilibre avec son environnement, dont le pH est bien inférieur. L'eau de l'extérieur pénètre à travers le système des pores et des capillaires, même dans un béton non fissuré, entraînant une diminution de son pH. Cette eau de l'extérieur peut également apporter des agents agressifs tels que les ions sulfates.

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et les diverses conditions d'usage, d'exploitation et maintenance.

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton sont généralement regroupés en trois catégories.

- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates ;
- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif ;
- La formation des nouveaux produits (généralement expansifs).

Compte tenu des multiplicités des types d'agressions chimiques d'une part, et des similitudes des dégradations constatées d'autre part, il est souvent très difficile d'établir un diagnostic simple et univoque. Mais malgré ces similitudes, on peut distinguer les attaques chimiques d'après les manifestations et les caractéristiques de chaque attaque : la corrosion par exemple est induite soit par la carbonatation, soit par la pénétration des ions chlorure, et dans

la plupart du temps on peut différencier entre les deux par l'éclatement : s'il est local, on parle des ions chlorures mais s'il est général c'est une carbonatation. Même les autres attaques telles que la réaction alcali-granulat (due aux granulats réactifs), l'attaque par les acides, par les sulfates et par l'eau de mer engendrent une fissuration et un gonflement mais chaque attaque a ses conséquences et ses manifestations qui la caractérisent. Donc la connaissance du milieu ou de l'environnement où se trouve l'ouvrage participe à connaître l'attaque.

Chapitre 3

Matériaux et procédures

Introduction

Dans ce chapitre, nous avons donné les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition de notre mortier (sable, ciment, adjuvants, eau et fibres) ainsi que les différents essais utilisés dans ce travail.

Le but de notre étude est d'étudier le comportement mécanique (compression et flexion) du mortier de fibres de verre conservé dans un milieu agressif (acide sulfurique et sulfate d'ammonium).

3.1 Matériaux utilisés

3.1.1 Ciment

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type **CEM I 52,5** provenant de France. Sa masse volumique est de 3100 kg/m^3 . La composition minéralogique du ciment est présentée dans le tableau (3.1).

Tableau 3.1: Composition minéralogique du ciment.

Composition minéralogique(%)			
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
65,94	10,47	8,24	8,52

3.1.2 Sable

Nous avons utilisé un sable normalisé de classe 0/2 (Figure 3.1). C'est un sable naturel et siliceux. Il est propre, ses grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Le sable est conditionné en sachets contenant chacun 1 350g. Sa masse volumique est de 2700 kg/m^3 .



Figure 3.1: Sable normalisé.

3.1.3 L'eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau de robinet, qui est une eau propre.

3.1.4 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est le SIKA VISCOCRETE TEMPO 12, qui est aussi un haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de grande qualité en termes de résistance et de fluidité. Ces caractéristiques techniques sont données dans le tableau (3.2).

Tableau 3.2 : Les caractéristiques du superplastifiant.

Densité	1,06 ± 0,01
pH	6 ± 1
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1%
Extrait sec	30,2 ± 1,3 %

3.1.5 Fibres

Les fibres de verre limitent les microfissures. Elles sont caractérisées par leur enrichissement en zirconium qui leur confère une meilleure durabilité vis-à-vis de l'attaque alcaline du ciment.

Nous avons utilisé :

- Les fibres de verre de type CemFil AR (alcali résistante), chaque fil est composé de 204 filaments ayant chacun un diamètre de 10 µm. La longueur des fibres est de 12 mm (Figure 3.2). Le taux de fibres utilisés est de 0,25%, 0,50% et 0,75% du volume total des constituants.

Afin de conserver une ouvrabilité correcte, nous avons ajouté à la composition avec le taux de 0,75% en fibres, le superplastifiant avec un taux de 0,75% du poids du ciment. Les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres sont données dans le tableau (3.3).

Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres de verre.

Masse volumique (kg/m³)	2680
Résistance en traction (GPa)	3
Module d'élasticité (GPa)	73
Résistance au feu (°C)	773
Allongement à la rupture (%)	4.3



Figure 3.2 : Les fibres de verre AR.

3.2 Composition des mortiers

Le mortier normal est le mélange du ciment CEM I 52,5, du sable normalisé et de l'eau avec un rapport E/C = 0,5.

Le tableau (3.4) donne les proportions de chaque constituant pour trois éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm³) de mortier témoin.

Tableau 3.4 : Composition d'un mortier témoin.

Type de matériau	Sable	Ciment	Eau
Poids (g)	1350	450	225

3.3 Formulation des mortiers

Nous avons mélangé le sable normalisé avec le ciment et l'eau dans les proportions suivantes : 450 ± 2 g de ciment, 1350 ± 5g de sable normalisé et 225 ± 1 g d'eau. Ce mortier est malaxé pendant 4minutes conformément aux prescriptions de la norme.

Le tableau (3.5) définit le programme expérimental et le nombre d'essais effectués dans chaque cas.

Tableau 3.5 : Désignation des différentes éprouvettes.

Désignation	COMPRESSION		
	Type	Dimension	Nombre
0 %	Prismatique	(4x4x4) cm ³	3
0,25 %	Prismatique	(4x4x4) cm ³	3
0,50 %	Prismatique	(4x4x4) cm ³	3
0,75 %	Prismatique	(4x4x4) cm ³	3
	FLEXION		
0 %	Prismatique	(4x4x16) cm ³	3
0,25 %	Prismatique	(4x4x16) cm ³	3
0,50 %	Prismatique	(4x4x16) cm ³	3
0,75 %	Prismatique	(4x4x16) cm ³	3

3.3.1 Préparation de la gâchée

Les mortiers ont été réalisés selon la norme (NF P 15 – 403). Le gâchage est réalisé à l'aide d'un malaxeur à axe verticale d'une capacité de 5 litres spécifié par la norme (NF P 15 – 411). Le gâchage comme le malaxage sont des opérations délicates. Il faut, d'une part, s'assurer d'une qualité d'enrobage acceptable et éviter la ségrégation des granulats. La durée du malaxage et la vitesse de malaxage sont des facteurs primordiaux dans l'homogénéité du mélange. De plus, l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur peut éventuellement influencer les caractéristiques de la pâte. Après gâchage, les moules sont remplis en trois couches d'égale épaisseur, chaque couche étant compactée par la mise en marche de la table vibrante.

3.3.2 Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes sont entreposées dans une salle humide à 20°C et 95% d'humidité relative pendant 24 heures. Une fois démoulées, elles sont conservées dans la même salle à 20°C et 95% HR pendant sept (7) jours. Après cette cure, on place les éprouvettes dans la salle à 20°C et 55% d'humidité relative jusqu'à 28 jours d'âge.

Deux série d'éprouvettes ont été confectionnées : la première série concerne les éprouvettes non pré fissurées, la deuxième série concerne les éprouvettes prés-fissurées (La pré-fissuration a été réalisée à 90 % de la résistance minimale) et ceci afin de provoquer des micros fissures et voir comment évolue la dégradation.

Après 28 jours d'âge, afin d'évaluer le comportement mécanique des mortiers étudiés, nous avons placé les éprouvettes dans deux environnements différents qui sont : la solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) et la solution de sulfate d'ammonium (NH_4SO_4). Les solutions d'acide sulfurique et de sulfate d'ammonium ont été concentrées à 0,5 moles de SO_4^{2-} par litre. Ce qui nous permettra de voir la variation des caractéristiques mécaniques des échantillons conservés dans une solution agressive après une certaine durée. Après trois mois de conservation dans les deux environnements, on a placé les éprouvettes dans la salle à 20°C et 55% HR pour sécher jusqu'à la stabilisation de leurs masses.

3.4 Essais sur mortiers

3.4.1 Essai de compression (NF P 18-406)

Notre objectif dans cette étude est de déterminer les résistances à la compression des différents mortiers. La résistance mécanique en compression d'un béton ou d'un mortier correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton ou mortier, c'est le paramètre fondamental de notre étude.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 200 kN. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406 sur des cubes de $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,25 mm/min, figure (3.3).

On note la charge maximale atteinte P (kN) et la surface de chargement A (m^2), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$\sigma_c(\text{MPa}) = P/A$$



Figure 3.3 : Essai de compression.

3.4.2 Essai de traction par flexion trois points (NF P 18-407)

L'essai de traction par flexion trois points est effectué sur des prismes de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, la distance « L » entre appuis est égale aux $\frac{3}{4}$ de la longueur de l'éprouvette soit 12 cm, figures (3.4). Afin d'éviter les effets parasites provoqués par les défauts de parallélisme et de planéité de la face supérieure de l'éprouvette, nous avons appliqué le chargement sur les faces latérales de l'éprouvette. Ensuite l'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à sa rupture.

Les essais de flexion ont été réalisés selon la norme NF P 18 – 407. La vitesse de montée en charge est de 0,1 mm/min.



Figure 3.4: Essai de flexion 3 points.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette étude avec leurs caractéristiques, la formulation des différents mélanges. Deux paramètres ont été variés : le pourcentage en fibres et l'environnement de conservation.

On a mentionné aussi l'identification et la caractérisation des différents matériaux utilisés dans notre recherche. Nous avons présenté le programme expérimental retenu dans cette recherche : le choix de corps d'épreuve et les conditions de conservation.

Chapitre 4

*Résultats et
interprétations*

Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des essais de compression et des essais de flexion 3 points. Les mortiers étudiés ont été placés dans deux environnements agressifs : l'acide sulfurique et le sulfate d'ammonium. Les mortiers sont formulés en faisant varier deux paramètres à savoir le pourcentage en fibres et la nature des éprouvettes (pré fissurées et non pré fissurées). Les matériaux renforcés sont caractérisés en flexion 3 points et en compression. Les essais de flexion ont été effectués sur des échantillons prismatiques de dimensions ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) et ceux de compression ont été réalisés sur des cubes équivalents ($4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$) comme c'est mentionné au chapitre 3.

4.1 Présentation des résultats

Dans ce chapitre on présente les résultats des essais de résistance à la flexion et la résistance à la compression, ainsi que la variation des contraintes et le module de Young pour tous les échantillons, sous forme de courbes et des histogrammes, qui nous permettent d'expliquer clairement les phénomènes constatés.

Les essais effectués sont réalisés à raison de 3 éprouvettes pour chaque essai.

4.2 Essai de résistance à la compression

Les figures suivantes montrent les résultats sous forme de courbes force – déplacement pour chaque cas étudié.

4.2.1 Acide sulfurique

Deux types d'éprouvettes ont été étudiés : non pré-fissurées (Figure 4.1) et pré-fissurées (figure 4.2).

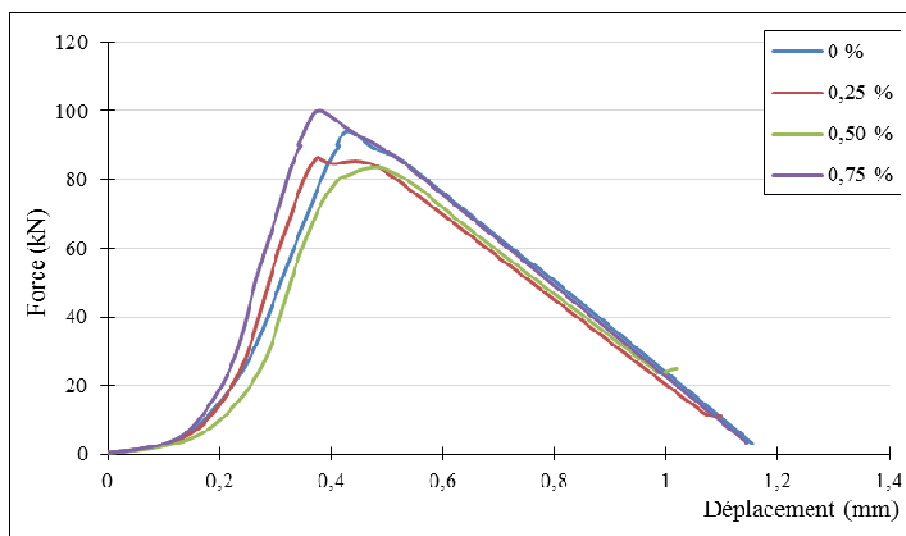


Figure 4.1 : Essai de compression sur éprouvettes non pré-fissurées.

La nature du milieu joue un rôle important dans le développement de la résistance à la compression du mortier. La comparaison entre l'évolution des résistances en compression du **mortier non pré-fissuré** avec des pourcentages en fibres différentes conservé dans l'acide sulfurique montre que :

-Le mortier avec 0.75% de fibres de verre conservés présente un meilleur comportement pour la résistance à la compression comparé aux mortiers avec des teneurs en fibre de 0.25% et 0.50%.

-Après le pic on a la deuxième phase dans laquelle on observe une chute brutale, sans rupture brusque, pour cette phase de déchargement on enregistre un meilleur comportement pour les mortiers fibrés à 0,75%. Les bords des fissures sont reliés par les fibres.

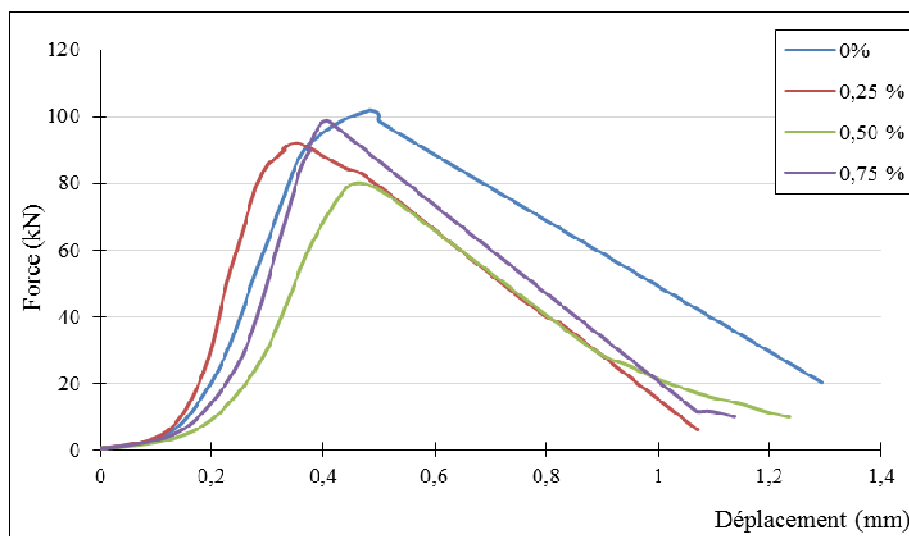


Figure 4.2 : Essai de compression sur éprouvettes pré-fissurées.

En ce qui concerne **les mortiers pré-fissurés** avec des pourcentages en fibres de verre différentes conservé dans l'acide, nous observons à travers les courbes force-déplacement que le mortier à 0,25% en fibres présente une meilleure ductilité. On a un allongement presque stable pour le mortier à 0.75% de fibres avant la chute brutale.

A partir du pic on observe une chute brutale, sans rupture brusque pour les mortiers avec fibres, pour cette phase de déchargement on enregistre un meilleur comportement pour les mortiers fibrés à 0,75%.

L'évolution de la résistance en compression en fonction du taux en fibres est donnée en figure (4.3) et le module de Young en figure (4.4).

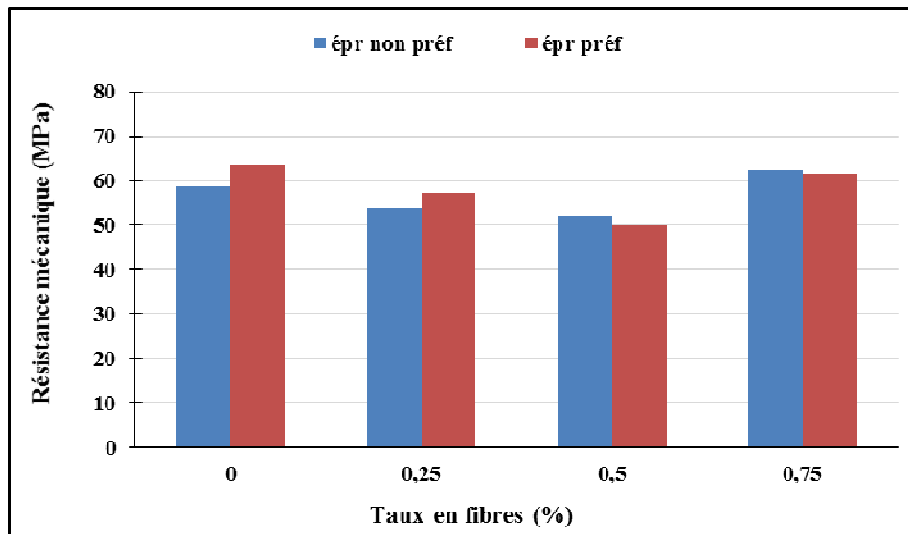


Figure 4.3 : Evolution de la résistance en fonction du taux en fibres.

On constate que pour les deux types d'échantillons (pré-fissurées et non pré-fissurées), la meilleure résistance est donnée par les mortiers à 0.75% de fibres. Les mortiers avec 0.25% et 0.50% en fibres présentent une légère chute de résistance.

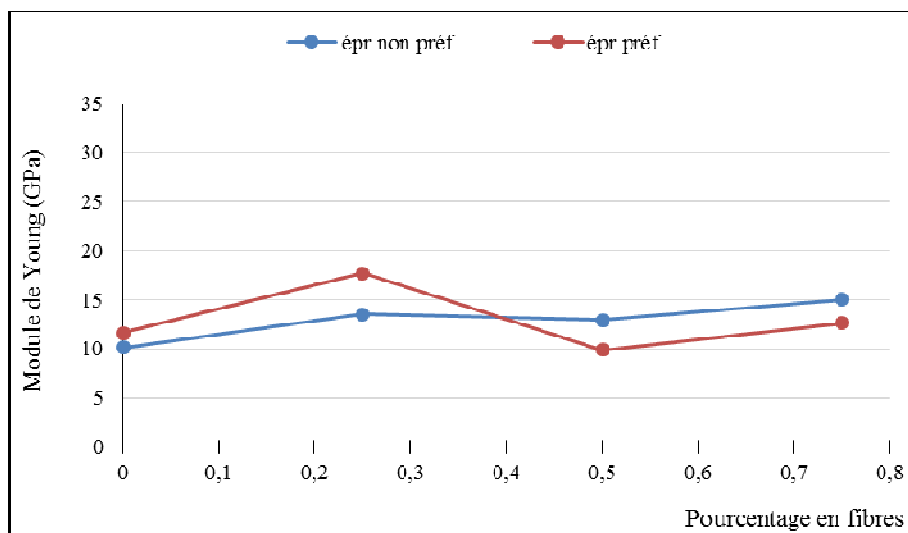


Figure 4.4 : Evolution du module de Young en fonction du taux en fibres.

Pour les mortiers conservés dans l'acide sulfurique, avec tous les pourcentages en fibres étudiés, le module de Young varie entre 10 GPa et 18 GPa. Le module de Young des mortiers à 0.50% et 0.75% en fibres chute par rapport aux mortiers à 0.25% en fibres.

4.2.2 Sulfate d'ammonium

Les figures (4.5), (4.6) et (4.7) montrent les résultats des essais de compression sur les éprouvettes non pré-fissurées et pré-fissurées conservés dans le sulfate d'ammonium.

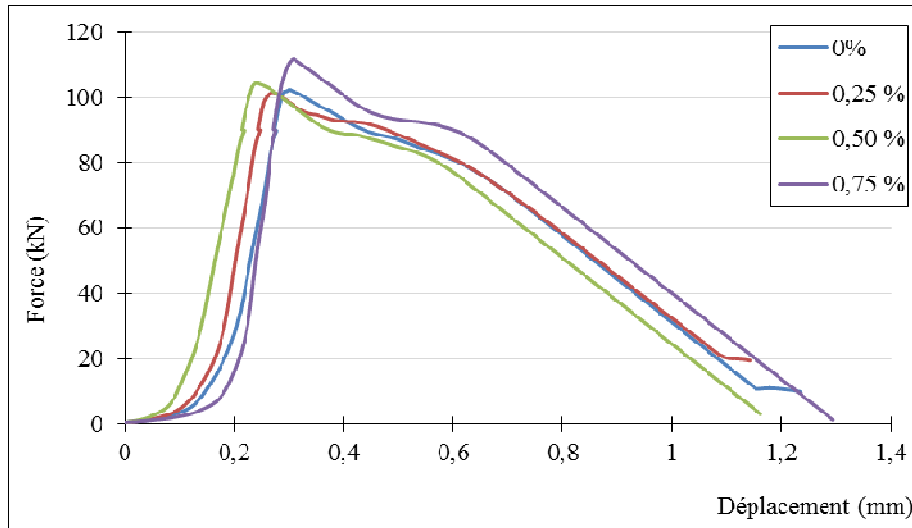


Figure 4.5 : Essai de compression sur éprouvettes non pré-fissurées.

Les résultats de l'évolution des résistances en compression du **mortier non pré-fissuré** avec les différents pourcentages en fibres conservés dans le sulfate d'ammonium montrent que :

-Le mortier avec 0.75% de fibres de verre présente un meilleur comportement pour la résistance à la compression comparé aux mortiers avec des teneurs en fibre de 0.25% et 0.50%.

Pour le mortier à 0.75% de fibres on a un allongement presque stable avant la chute brutale de charge.

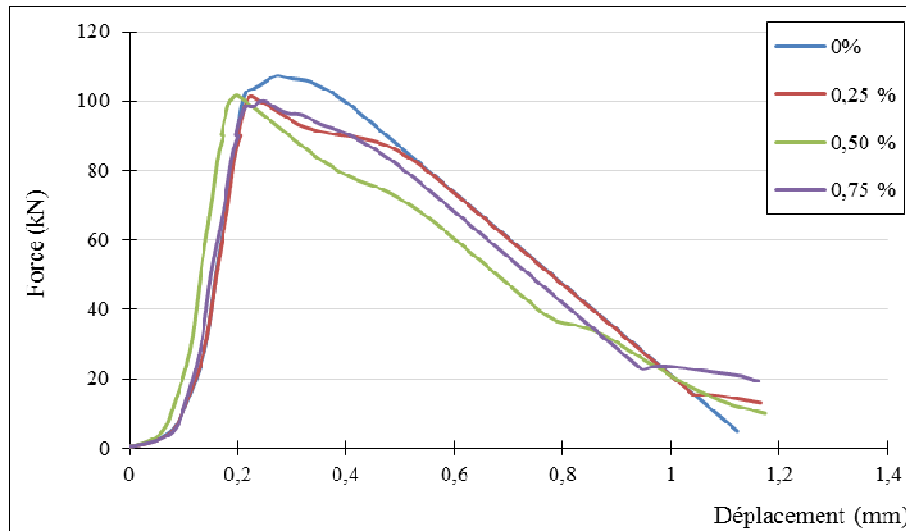


Figure 4.6 : Essai de compression sur éprouvettes pré-fissurées.

Pour les éprouvettes non pré-fissurées et conservées dans le sulfate d’ammonium, on constate que toutes les courbes ont la même allure. Les mortiers fibrés ont présenté les meilleures résistances comparés au mortier sans fibres. Alors que pour les mortiers pré-fissurés, les résistances en compression des mortiers fibrés ont diminué par rapport au mortier sans fibres.

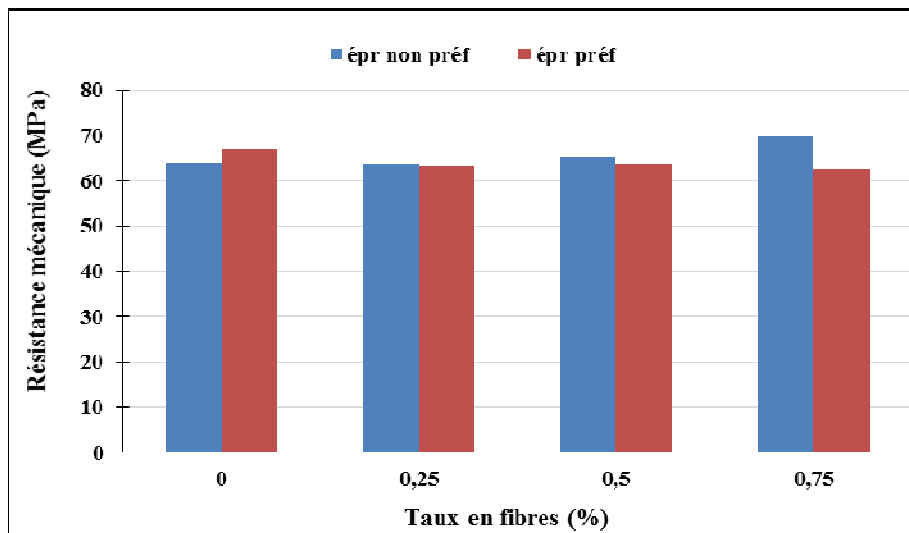


Figure 4.7: Evolution de la résistance en fonction du taux en fibres.

En comparant les résistances en compression des éprouvettes non pré-fissurées, on constate que la meilleure résistance est donnée par le mortier de fibré à 0.75%, elle est de 70 MPa. Pour les éprouvettes pré-fissurées, la meilleure résistance est donnée par le mortier sans fibres (0%) elle est égale à 68 MPa.

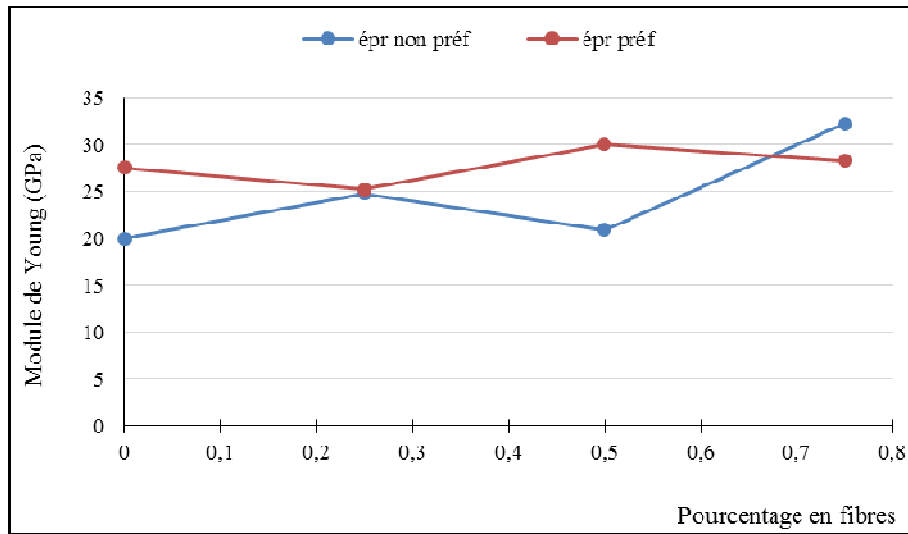


Figure 4.8 : Evolution du module de Young en fonction du taux en fibres.

Pour les mortiers conservés dans le sulfate d'ammonium, le module de Young varie entre deux valeurs 20 GPa et 33 GPa. Le mortier non pré-fissuré avec un taux en fibres de 0.75% a présenté un module de Young supérieur par rapport aux autres mortiers. Alors que pour les mortiers pré-fissurés, on constate une légère augmentation du module de Young.

4.3 Essai de résistance à la flexion trois points

Le comportement en flexion est l'un des aspects les plus importants pour un béton fibré, car ce matériau composite subit, le plus souvent, ce type de chargement, dans ses diverses applications. Les courbes effort-déplacement ont été tracés pour les deux environnements de conservation.

4.3.1 Acide sulfurique

Les figures (4.5) et (4.6) montrent les résultats des essais de flexion trois points sur les éprouvettes non pré-fissurées et pré-fissurées conservés dans l'acide sulfurique.

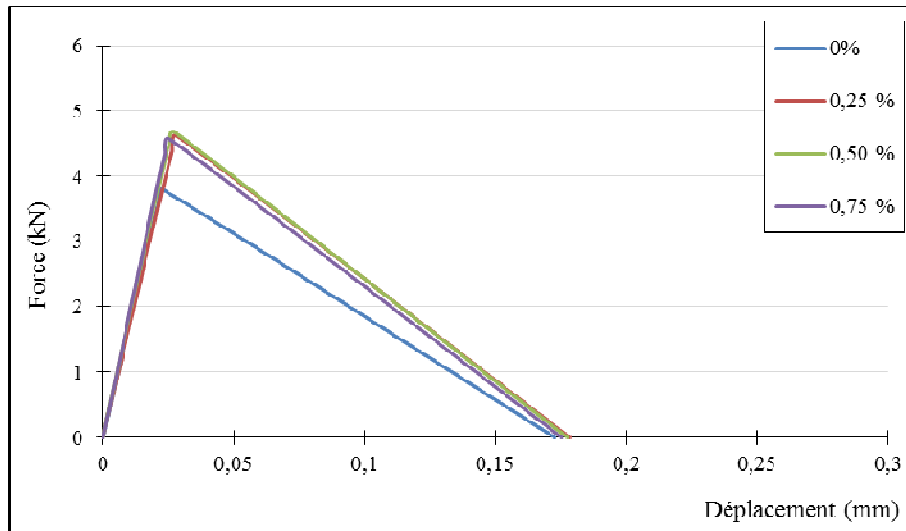


Figure 4.9 : Essai de flexion sur éprouvettes non pré-fissurées.

Les courbes force déplacements obtenus montrent que les mortiers de fibre de verre non pré-fissurées ne se rompent pas brutalement, ils présentent un comportement plutôt ductile. Les mortiers à 0.25%, 0.50% et 0.75% de fibres présentent un même comportement en flexion et des résistances supérieures à celle du mortier sans fibres.

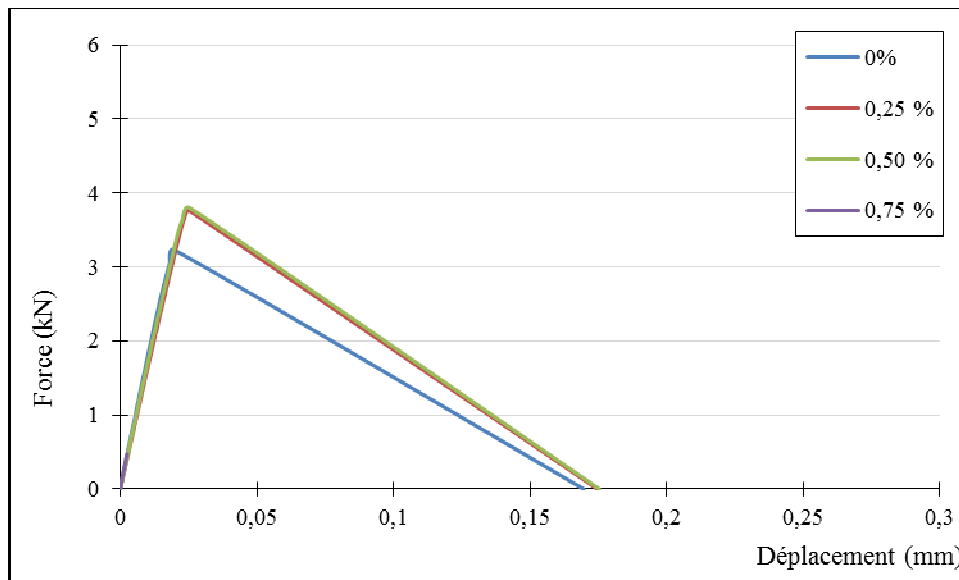


Figure 4.10 : Essai de flexion sur éprouvettes pré-fissurées.

Dans le cas des éprouvettes pré-fissurées, les courbes obtenues montrent que les mortiers fibrés ne se rompent pas brutalement, ils présentent un comportement plutôt ductile.

Les mortiers à 0.25%, 0.50% et 0.75% de fibres ont présenté les meilleures résistances par rapport au mortier sans fibres.

4.3.2 Sulfate d'ammonium

Les courbes force-déplacement des éprouvettes non pré-fissurées et éprouvettes pré-fissurées sont données en figures (4.11) et (4.12).

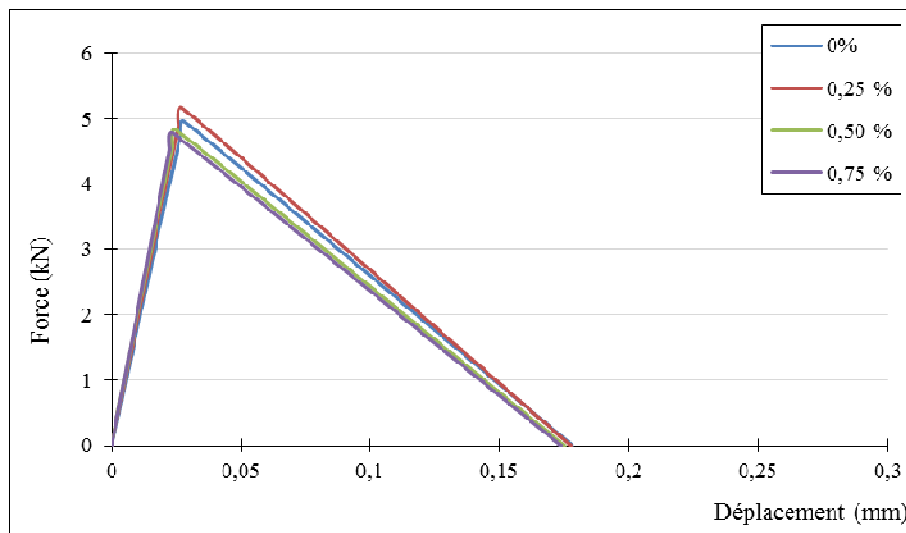


Figure 4.11 : Essai de flexion sur éprouvettes non pré-fissurées.

Les courbes force déplacements des éprouvettes non pré-fissurées montrent que les mortiers fibrés ne se rompent pas brutalement, ils présentent un comportement plutôt ductile. Le mortier avec un taux de 0.25% en fibres présente la meilleure résistance en flexion.

La pente est la même pour tous les mortiers, le comportement post fissuration est meilleur pour les mortiers à 0.25 % de fibres.

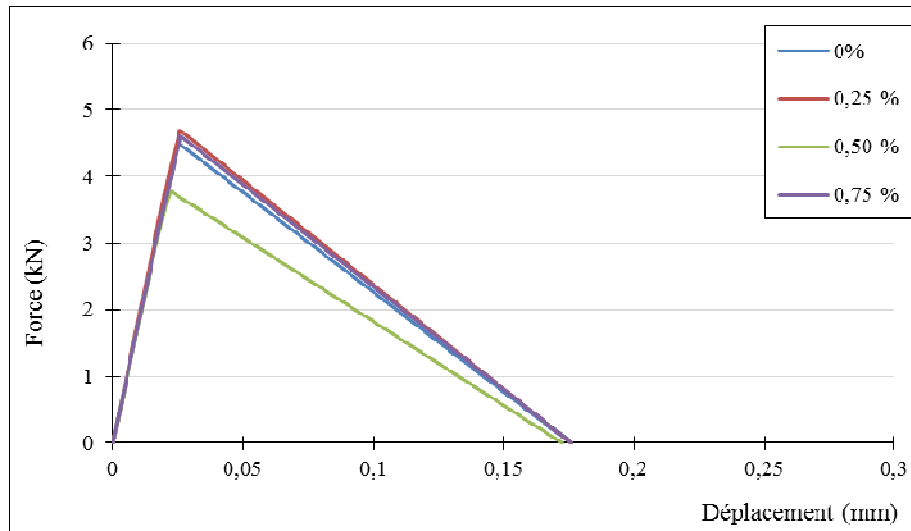


Figure 4.12 : Essai de flexion sur éprouvettes pré-fissurées.

Les courbes forces-déplacements ont la même allure. Les mortiers avec un taux en fibres de 0,50% ont présenté une chute de résistance à la flexion comparés aux autres mortiers.

Conclusion

L'incorporation des fibres de verre dans la formulation du mortier permet d'améliorer l'ensemble des propriétés du matériau et jouent un rôle important pour que les propriétés mécaniques soient élevées.

La résistance à la flexion des mortiers fibrés conservés dans le sulfate d'ammonium est supérieure par rapport aux mortiers témoin et aux mortiers conservés dans l'acide sulfurique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Dans cette étude expérimentale nous nous sommes intéressés à l'étude du comportement mécanique des mortiers avec ajout de fibres de verre de type AR dans un environnement agressif. La résistance à la compression, à la flexion, les modules de Young et les contraintes de rupture ont été déterminés pour les différents types de mortiers étudiés. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que :

- L'ajout de fibres de verre dans la matrice engendre une nette amélioration de la résistance à la flexion.
- Les mortiers fibrés ont présentés les résistances à la compression supérieures à celle des mortiers sans fibres.
- L'amélioration apportée sur le comportement mécanique en compression est due à la formation des cristaux dans les mortiers.
- L'ajout des fibres de verre confère une ductilité significative au matériau par rapport au mortier sans fibres, vu qu'on a obtenus des ruptures ductiles.
- Les mortiers à 0.75% de fibres de verre présentent des modules d'élasticités en compression élevée pour les différents environnements.
- En milieu du sulfate d'ammonium le mortier non pré fissurés avec 0.75% de fibres présentent un module élastique en flexion élevé.
- L'immersion dans la solution d'acide sulfurique attaque plus les éprouvettes des mortiers étudiés par rapport à la solution de sulfate d'ammonium.
- Ainsi le choix d'utiliser des fibres de verre comme ajout est avantageux du point de vue économique et écologique, et offre une possibilité pour améliorer la durabilité des mortiers.

Reste l'inconvénient de dégradation des fibres de verre dans un milieu alcalin. Les voies d'améliorations préconisées jusqu'à maintenant restent insuffisantes et ouvrent le chemin à de nouvelles améliorations. Le développement de nouvelles fibres de verre plus résistantes aux alcalins que celles disponible sur le marché résoudra probablement le problème de dégradation de ces fibres. Le développement de cette catégorie de fibre ne peut se faire sans la participation des autres spécialistes hors du domaine du génie civil.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHAFI N., Matrice cimentaire renforcée de fibres : Valorisation des sous produit (polystyrène, copeau d'acier et copeaux de bois), thèse magistère, université Constantine ,2005
- [2] YVES PERROT. Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre / polyester utilisés en construction navale de plaisante –cas de résines polyester limitant les émissions, 2006, thèse de doctorat, université de Bretagne Sud. (p.52).
- [3] GILBERT CHRETIEN, Matériaux Composites à Matrice Organique, Edition Technique et Documentation, 1986.
- [4] NESSAH D., Influence de la qualité de fibre naturel (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers fibrés, université Boumerdes, 2017.
- [5] Thèse doctorat Mme Akmoussi ,2016.
- [6] HOUGET V., (1992), Étude des caractéristiques mécaniques et physico-chimique des composites ciments-fibres organiques Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [7] Ma Y., Zhu B., Tan M., (2005), Proprieties of ceramic fiber reinforcedcement composites. Cement and concreteresearch, pp. 296-300.
- [8] ABDOU KAMEL, Influence des fibres métalliques sur les variations dimensionnelles et pondérales d'une matrice cimentaire, 2007. Thèse de Doctorat, Université de Canstantine, Algérie. (pp.13, 28,29).
- [9] AURELIEN MAZZONI, Comportement thermomécanique d'un béton réfractaire du renforcement par des fibres minérales, 2009. Thèse de doctorat, Université de Toulouse. (pp.7, 8, 2, 27, 28, 29).
- [10] J-L .VINGNES, I.BOURROIES, Expériences sur l'élaboration et les propriétés d'un matériau, vol 91, Janvier 1997: Bulletin de l'union des physiciens. (pp.205-206).
- [11] EXPERTISE COLLECTIVE, Effets sur la santé des fibres de substitution à l'amiante, Les Editions INSERM ,1999.

- [12] MINARD.J. , HOANG.L.H.et WELLS.L.S « Le béton de fibre ». Rapport bibliographique. Paris : centre d'étude du bâtiment et travaux publics.1986.92 p.
- [13] ZOLLO.R.F, « fiber- reinforced concrete : an overview after 30 years of development ». *Cements and concrete composites*.vol.19.1997.
- [14] ASTM , standard Test Method for flexural toughness and first- crack strength of fibre-reinforced concrete, STM C 1018- 92, vol 04.02, USA, 1992,pp.510-516.
- [15] GOPARALANAM. V.S «On the characterization of flexural in fibre- reinforced concretes » *Cement and Concrete Composites*, vol. 17, 1995, pp.239- 254.
- [16] MINDESS.S., CHEN. L et MORGAN. D .R. "Determination the first- crach strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete». *Journal of ACBM*, 1(5), 1994, pp .201-208.
- [17] AIT –TAHAR .K. "Mode de rupture par flexion des poutres composites en béton de fibres ". *Annales BTP*, N° 04, 2001, pp .11-17.
- [18] DEBICKI. G et HAMEELIN.P. "Mécanisme de fissuration des mortiers renforcés de rubans métallique amorphes ". *Rilem Symposium*, Versailles, 1987, pp .820-823.
- [19] DURAND G., "les bétons à base de fibres d'acier" *CERILH stage*26-02-1986 N° 6 p6 et *Annales N°347 Février* 1977 pp 48-49.
- [20] JECIC D., ZANGHELLINE F., "Mortiers et ciments armés de fibres ", Etude bibliographique *Annales N°347 Février*, pp.75-76.
- [21] ROSSI.P. "Les bétons de fibres métalliques ". presses de l'ENPC.1998 ,309p.
- [22] ARABIN, REDJEL .B et JAUBERTHIE. R. "Influence du taux et de la longueur des fibres de verre sur le comportement en statique et en fatigue d'un matériau composite ciment-verre (CCV)". *Proceeding sur CD*, colloque méditerranéen sur les matériaux. ENSET d'Oran ,06 et 07 Décembre 2005.
- [23] ALI. M.A, MAJUMDAR. A.J et SINGH .B. "Properties of glass fiber cement, the effect of fibre length and content ". *J.MATER.SCI .*, 1975,vol .10, N° 10 , pp.1732-1740.

- [24] A. M. Boddy-R.D. Hooton-M. D. A. Thomas “ the effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction” Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 1263-1268-2003.
- [25] M. H. Shehata, M.D. A. Thomas”The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction” Cement and Concrete Research, Vol. 30 pp. 1063-1072-2000.
- [26] Mohamed .I. Contribution à l’étude du confinement du béton alcali – réactif par matériaux composites carbone époxy. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, (2004)
- [27] A.Carles, M.Abérubé« La durabilité des face à l’alcali réaction »-La Durabilité des bétons, Press de l’école nationale des Ponts et Chaussés, ISBN 2-85978-186-6, Paris 1992, pp : 300-307.
- [28] « Concret durability »-article d’Internet, pp : 1-14.
- [29] DELOYE F.X., (1989), Identification rapide des ciments sur chantier. Bulletins liaison Laboratoires des ponts et chaussées, pp. 65-70.
- [30] Manuel d’identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d’art. Laboratoire Central des Ponts et chaussées
- [31] LE BESCOP P., SOLET C., (2006) ,External sulphate attack by ground water. Experimental study of CEM I cement pastes. Revue européenne de génie civil, 19 p
- [32] BOUKERROUCHE.N. Durabilité des bétons, influence des paramètres de composition et de traitement. Thèse de magister, Université Constantine, (2009)
- [33] ESCADEILLAS G., HORNAIN H., (2008) .La durabilité des bétons vis-à-vis des environnements chimiquement agressifs. Dans « La durabilité des bétons », Presses de l’école nationale des Ponts et chaussées.
- [34] UKRAINCIK V., BJECOVIC D., DJUREKOVIC A., (1978).Concrete corrosion in a nitrogen fertilizer plant. Durability of building materials and components, P.J. Sereda and G.G. Litvan eds., ASTM, Philadelphia, STP 691, pp. 397-409.

[35] JAUBERTHIE R., RENDELL F., (2003). Physicochemical study of the alteration surface of concrete exposed to ammonium salts. *Cement and Concrete Research* 33, pp. 85-91.

[36] SMOLCZYK H.G., (1968) .Chemical reactions of strong chlorides solutions with concrete. 5th Int. Symp. On the Chemistry of Cement, Tokyo, 3, pp. 274-280.

[37]TAYLOR H.F.W., (1997). *Cement Chemistry*. Thomas Telford, 2nd edition, pp. 123-127.

[38] *J. P Olivier : livre de " Durabilité des bétons ". (A.NONAT :chapitre2 ; V. BAROGHEL-BOUNY, B. CAPRA, S. LAURENS : chapitre9 ; A. CARLES-GIBERGUES, H.HORNAIN :chapitre11 ; G. ESCADEILLAS, H. HORNAIN: chapitre 12) .(Edition :Presse de l'école nationales des ponts et chaussées -2008).*

[39] *NDZANA AKONGO Grégoire & TCHOUMI Samuel : Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures (Diplôme des Professeurs des lycées d'Enseignement Technique 2^{ème} grade -Université de Douala).*

[40] R.Lesage « Les granulats »-Le béton hydraulique-La Durabilité des bétons, Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussés, ISBN 2-85978-186-6, Paris 1992, pp : 39-58.

[41] ANDRA « Les attaques chimiques couples »-Les matériaux cimentaires, Tome 4,INSA, LMDC, Toulouse, France, C.RP.AMAT 01060 /A, pp : 60.

[42]*Yassine SENHADJI : L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfatiques) (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran -2006).*

Résumé

Ce travail porte sur l'étude du comportement mécanique et de durabilité des mortiers renforcés de fibres de verre conservé dans deux milieux agressifs (Acide sulfurique et sulfate d'ammonium). Les fibres utilisées sont de type Cem filAR (alcali résistante).

Le principe du renfort était dans l'objectif d'améliorer les caractéristiques physico-chimiques des mortiers. Ce principe nous a conduits à l'utilisation des fibres de verre avec des taux de renforcement progressifs.

Nous avons réalisé deux essais : essais de résistance à la compression et essais de résistance à la flexion. Ces essais ont été confectionnées deux séries d'éprouvettes : la première série concerne les éprouvettes non pré-fissurées et la deuxième série concerne les éprouvettes pré-fissurées. Les compositions ont été fabriquées avec un rapport eau sur ciment de 0.5 et un dosage en fibres de 0.25%, 0.5 % et 0.75%.

Les résultats ont montrés que le renforcement des mortiers par les fibres de verre joue un rôle important sur l'amélioration de la résistance en compression. On a constaté une diminution de résistance mécanique en flexion. L'exposition aux différents acides, montre une dégradation confirmée par la présence du gypse surtout pour les mortiers exposés à l'acide sulfurique.

Mots clés : Résistances mécaniques, durabilité, mortiers, fibre de verre Cem fil AR, acide sulfurique, sulfate d'ammonium.