

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Ingénierie des structures

Par : Ziane Houssam Eddine & kolli chahinez

Thème

ETUDE THEORIQUE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE ET DURABILITE DES BETON FIBRES

DIRECTEUR DU MEMOIRE : *Pr. Boukli Hacene Sidi Mohammed El Amine*

Devant le jury composé de :

PRÉSIDENT : *Mr. HOUTI Farid Brahim*

EXAMINATEURS : *Pr. SAIL Latifa*

Année Universitaire: 2020-2021

Remerciements

Nous remercions tout d'abord **ALLAH** tout-puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Nous exprimons en premier lieu nos remerciements à notre directeur de mémoire Professeur **Boukli Hacene Sidi Mohammed El Amine**, pour son indéfectible soutien, ses conseils et facilitations durant la préparation de ce travail. Qu'il trouve ici toutes nos reconnaissances.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer notre mémoire, principalement Monsieur **HOUTI Farid Brahim** qui a accepté de présider ce jury de soutenance. Nos remerciements s'adressent également à Professeur **SAIL Latifa** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

À nos amis de la promotion ainsi qu'à tout le personnel du département de génie civil de l'université de Tlemcen.

Et finalement, nous tenons à remercier les personnes qui ont bien voulu contribuer de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce travail à la mémoire de mes parents, lumière de mon cœur, qui étaient la source de ma réussite et j'espère de toute personne ayant lue ce mémoire d'avoir de pieuses pensées pour eux. Aussi, ma belle fiancée et à toute ma famille qui m'a toujours soutenue et encouragée dans mes différents choix d'études et personnels. Un grand merci à ma belle-mère.

Ziane Houssam Eddine

DEDICACES

-Je dédie mes chaleureux remerciements à mes très chers parents et mon grand père

-Ma sœur adorable "Ahlam" et mon cher frère "Ismail"

- Mes chères copines "Laribi Hadjer" et "Nadjer Meriem"

- A mon cher "Tounsi Djawed" merci d'être toujours là

Merci à tous de m'avoir permis de vivre ça!!

Kolli chahinez

Résumé

L'objectif de ce travail est de faire une étude sur la confection des bétons renforcés par des fibres du point de vue mécanique et durabilité, ainsi que l'identification de quelques facteurs et pathologies qui affectent le béton.

Le but de l'ajout de fibres vise à améliorer les performances du béton telle que la fluidité, la durabilité, la résistance, etc. Cette dernière a un impact significatif sur les matériaux cimentaires à l'état frais et à l'état durci. Toutefois, au cours de notre étude, nous avons examiné différents types de fibres et certaines de leurs applications. De plus, restons dans le concept de la fabrication et la formulation du béton, nous avons fait une recherche sur la durabilité des bétons confectionnés pour les trois types de fibres (fibres métalliques, fibres de verres et les fibres de polypropylène).

Notre intérêt s'est également porté sur la recherche des résultats des chercheurs obtenus à travers des expériences sur la résistance à la compression et la perte de masse des bétons avec et sans fibres.

Mots clés : Béton fibré, Fibres, Environnement agressif, Durabilité, résistance mécanique, Perte de masse.

Abstract

The objective of this work is to carry out a study on the fabrication of concrete reinforced with fibers from a mechanical and durability point of view, as well as the identification of some factors and pathologies that affect concrete.

The purpose of adding fibers is to improve concrete performance such as fluidity, durability, strength, etc. The latter has a significant impact on both fresh and hardened cementitious materials. However, during our study, we looked at different types of fibers and some of their applications. In addition, staying in the concept of the manufacture and formulation of concrete, we did a research on the durability of concrete made for the three types of fibers (metal fibers, glass fibers and polypropylene fibers).

Our interest also focused on researching the results of researchers obtained through experiments on the compressive strength and mass loss of concrete with and without fibers.

Keywords : Fiber-reinforced concrete, Fibers, Agressive environment, Durability, Mechanical resistance, Mass loss.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة لتصنيع الخرسانة المسلحة بالألياف من وجهة نظر ميكانيكية وقوة التحمل، وكذلك تحديد بعض العوامل والأمراض التي تؤثر على الخرسانة.

الغرض من إضافة الألياف هو تحسين أداء الخرسانة مثل السيولة والمتانة والقوة وما إلى ذلك. هذا الأخير له تأثير كبير على كل من المواد الأسمنتية الطازجة والمصلدة. ومع ذلك، أثناء دراستنا، نظرنا في أنواع مختلفة من الألياف وبعض تطبيقاتها. بالإضافة إلى ذلك، مع التمسك بمفهوم تصنيع وصياغة الخرسانة قمنا بإجراء بحث حول متانة الخرسانة المصنوعة من الألياف الثلاثة (الألياف المعدنية والألياف الزجاجية وألياف البولي بروبيلين).

ركز اهتمامنا أيضًا على البحث في نتائج الباحثين التي تم الحصول عليها من خلال التجارب على مقاومة الانضغاط وفقدان الكتلة للخرسانة مع الألياف وبدونها.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المسلحة بالألياف، الألياف، البيئة العدوانية، المتانة، المقاومة الميكانيكية، خسارة الكتلة.

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre : 01 Matériaux cimentaires fibrés.....	3
1.1. Introduction.....	3
1.2. Constituants des bétons	3
1.2.1. Généralités sur le béton	3
1.2.2 Les constituants	4
1.3. Fabrication des bétons fibrés	16
1.3.1. Le béton de fibres	16
1.3.2. Historique du béton de fibres	17
1.3.3. Formulation des BFM	18
1.3.4. Objectifs d'une formulation	18
1.3.5. Description de la méthode	18
1.3.6. Fabrication de béton de fibres	24
1.3.7. Procédures de mélange	26
1.4. Conclusion.....	27
Chapitre 02 : Durabilité et quelques pathologies observées sur les bétons fibrés.....	28
2.1. Introduction.....	28
2.2. Durabilité des bétons renforcés par des fibres métalliques	28

2.2.1. Généralités sur les fibres métalliques.....	28
2.2.2. Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton	29
2.3. Durabilité des bétons renforcés par des fibres polypropylène	34
2.3.1. Généralités sur les fibres polypropylène	34
2.3.2. Influence des fibres polypropylène sur le comportement du béton	34
2.4. Durabilité des bétons renforcés par des fibres de verre	37
2.4.1. Généralités sur les fibres de verre	37
2.4.2. Influence des fibres de verre sur le comportement du béton	37
2.5. Pathologie des bétons fibrés	43
2.5.1. Alkali – Réaction	43
2.5.2. Lixiviation	47
2.5.3. Carbonatation	51
2.5.4. Attaque sulfurique	52
2.5.5. Attaque chimique	55
2.6. Conclusion.....	57
Chapitre 03 : Présentation de quelques travaux antérieures (mécanique et durabilité).	58
3.1. Introduction	58
3.2. Résultats obtenus par les auteurs (résistance à la compression et perte de masse).....	58
3.2.1. Résistance à la compression	58
3.2.2. Perte de masse	76
3.3. Conclusion	88
CONCLUSION GENERALE.....	89
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	90

Liste des figures

Figure 1.1 : Photos des différents types de granulats.....	6
Figure 1.2 : Types de fibres d'acier (Grueward et al. 2004)[12].....	11
Figure 1.3 : Fibres de carbone dans le béton (Grueward et al. 2004) [12].....	12
Figure 1.4 : Fibres en polypropylène (Grueward et al. 2004) [12].....	12
Figure 1.5 : Fibres de verre.....	13
Figure 1.6 : Fibres de Chanvre (Grueward et al. 2004) [12]	13
Figure 1.7 : Rôle des fibres dans la matrice du béton [10].....	14
Figure 1.8 : Effet des fibres incorporés dans un béton sur son affaissement [16].....	20
Figure 1.9 : Effet de la teneur en fibres d'acier et de leur élancement sur l'ouvrabilité Ve- Be [15].....	21
Figure 1.10 : Encadrement d'un granulat [16].....	21
Figure 1.11 : Teneur maximale en fibres en fonction de la teneur en gros granulats [16].....	22
Figure 1.12 : Affaissement au cône en fonction du module de finesse [18].....	23
Figure 1.13 : Abaques reliant la composition granulatoire optimale du béton au pourcentage en fibre [18].....	23
Figure 1.14 : Abaque permettant d'établir une formulation du béton de fibres [18].....	24
Figure 1.15 : Procédure de mélange pour béton de fibre (1995)[18].....	26
Figure 2.1 : Courbe contrainte-déformation du béton témoin à 20°C [81].....	29
Figure 2.2 : Courbes contraintes-déformations du béton témoin (BT) à différentes températures [81].....	30
Figure 2.3 : Courbes contraintes-déformations des bétons de fibres métalliques (BFM) à différentes températures [81].....	31
Figure 2.4 : Courbes Force-déplacement du béton témoin (BT) à différentes températures [81].....	32
Figure 2.5: Courbes Force-déplacement du béton de fibres métalliques (BFM) à différentes températures [81].....	33

Figure 2.6 : Courbes contraintes-déformations des bétons de fibres de polypropylène (BFPP) à différentes températures [81].....	35
Figure 2.7 : Courbes Force-déplacement du béton de fibre de polypropylène (BFPP) à différentes températures [81].....	36
Figure 2.8 : Déformations longitudinale et transversale obtenues avec un essai de compression [82].....	39
Figure 2.9 : Mode de rupture en compression de l'échantillon cylindrique [82].....	40
Figure 2.10 : Courbes contrainte-déformation de traction par fendage [82].....	42
Figure 2.11 : Mode de rupture en traction par fendage [82].....	42
Figure 2.12 : Phénomène d'alcali réaction rencontrée [28].....	44
Figure 2.13 : Ouvrage atteint de réaction alcali-silice [31].....	45
Figure 2.14 : Un exemple d'ouvrage affecté par la réaction alcali-carbonate [79].....	46
Figure 2.15 : Aspect d'une surface en béton ayant été soumise au phénomène de lixiviation [39].....	49
Figure 2.16 : Diagramme d'équilibre entre le rapport Ca/Si des différents hydrates et la concentration en calcium de la solution interstitielle [33].....	51
Figure 2.17 : Éclatement du béton d'enrobage à cause de la carbonatation [28].....	52
Figure 2.18 : Dégradations causées par les attaques sulfatiques [28].....	53
Figure 2.19 : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage [38].....	56
Figure 3.1 : Diagramme contrainte-déformation du béton renforcé avec différents pourcentages (à gauche) et rapports l/d de fibres (à droite) sous une charge de compression (ACI, 1988).....	59
Figure 3.2: Résistance à la compression du béton à différents âges (Chern et Young, 1989).....	59
Figure 3.3 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f1) [78].....	61
Figure 3.4 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f2) [78].....	62
Figure 3.5 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibres f1 et f2) [78].....	62
Figure 3.6: Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f3) [78].....	64
Figure 3.7 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f1, f2 et f3) [78].....	65

Figure 3.8 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression ($V_f = 1.0\%$) [78].....	67
Figure 3.9 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression ($V_f = 1.5\%$) [78].....	68
Figure 3.10 : L'effet de la rigidité sur la résistance à la compression ($V_f = 1.0\%$) [78].....	69
Figure 3.11 : L'effet de la rigidité sur la résistance à la compression ($V_f = 1.5\%$) [78].....	69
Figure 3.12: Évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction des températures [63].....	71
Figure 3.13: Évolution du gain de résistance en compression du béton renforcé de fibres [64].....	72
Figure 3.14 : Effet du PF sur la résistance à la compression du béton à 7 jours [65].....	74
Figure 3.15 : Effet du PF sur la résistance à la compression du béton à 28 jours [65].....	74
Figure 3.16 : Variation de la résistance à la compression du cube en fonction de la teneur en fibre de verre [66].....	75
Figure 3.17 : Augmentation/diminution de la résistance à la compression du cube avec la teneur en fibre de verre [66].....	75
Figure 3.18 : Perte en poids en fonction d'âge pour les bétons témoins [78].....	77
Figure 3.19 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSD [78].....	77
Figure 3.20 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSDA1 [78].....	78
Figure 3.21 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSDA2 [78].....	78
Figure 3.22 : Retrait en fonction de la perte en poids pour les bétons témoins [78].....	79
Figure 3.23 : Retrait en fonction de la perte en poids pour les mélanges BSD [78].....	80
Figure 3.24 : Retrait en fonction de la perte en poids pour les mélanges BSDA1 [78].....	80
Figure 3.25 : Retrait en fonction de la perte en poids pour les mélanges BSDA2 [78].....	81
Figure 3.26 : Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenue par séchage à 105°C [68].....	82
Figure 3.27 : Courbe montrant la Perte de masse de bétons sans et avec $1.8\text{ kg}/\text{m}^3$ de fibres de polypropylène à la suite du traitement thermique au feu standard ISO 834 [74].....	83
Figure 3.28: Perte de masse des bétons étudiés durant le séchage à 105°C [68].....	84

Figure 3.29 : Perte de masse des éprouvettes 104x30 mm ² et 104x60 mm ² étuvées à 105°C[68].	85
Figure 3.30: Perte de masse des bétons testés en fonction de la température de chauffage : une plus faible perte de masse pour les BHP que les BO [72].	85
Figure 3.31: Évolution de la perte de masse suivant la vitesse de chauffage [71].	86
Figure 3.32 : Evolution de la perte de masse en fonction de la température du cycle de chauffage refroidissement pour(a) des bétons à haute performance sans fibres B et avec des fibres métalliques BM15,BM19.5 et BM39(b) le béton sans fibresB1et B2 et les bétons avec des fibres métalliques,B1M15,B1M19.5 et B1M39[77].	86
Figure 3.33: Evolution de la perte de masse des bétons sans fibres et avec des fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement [77].	87

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les différents types des granulats et leur Caractéristiques.....	6
Tableau 1.2 : Application des fibres.....	15
Tableau 2.1: Béton témoin sans fibres	30
Tableau 2.2 : Résistances en traction par flexion des différents bétons (BT et BFM).....	34
Tableau 2.3 : Résistances en traction par flexion des différents bétons (BT et BFPP).....	37
Tableau 2.4 : Propriétés mécaniques obtenues des matériaux de référence et fibrés.....	40
Tableau 2.5 : Principales valeurs remarquables relevées dans l'essai de traction par fendage	43
Tableau 3.1 : L'effet du PF sur la résistance à la compression du béton [65].....	73

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de la construction et du bâtiment, malgré sa complexité. Il contient habituellement un mélange de ciment, d'eau et des granulats, mais il est considéré comme homogène. Non seulement, il peut être moulé dans les formes les plus diverses (coupole, voûte et des éléments avec des formes compliquées), mais aussi une excellente résistance à la compression et une grande rigidité.

Ces caractéristiques ont néanmoins limité son utilisation : il est fragile (résistance au choc), il résiste mal à la traction et il est sujet à la fissuration dans le cas des éléments minces. Pour cela, on ajoute des fibres (béton de fibre), qui peuvent apporter une meilleure réponse au problème de la fragilité du béton et minimiser le risque de fissuration, ce qui permettra d'améliorer sa durabilité et sa résistance. Il existe actuellement une grande variété de fibres. Parmi les plus utilisées, les fibres d'acier, de verre, d'amiante et de polypropylène...etc.

Il est nécessaire, non seulement de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une bonne durabilité afin de répondre aux exigences demandées pour la mise en service de la structure, donc le problème qui reste toujours est celui de chercher une meilleure composition de béton fibré.

L'ajout des éléments fins qui doivent comporter au moins une addition minérale, moins de gravillons, un dosage en adjuvant superplastifiant et assez souvent un agent colloïdal, peut produire des bétons très maniables qui s'étalent, sans aucune vibration, dans les coffrages et se caractérisent par une grande fluidité et une grande capacité de remplissage, tout en étant stables et garantissent aussi de bonnes performances mécaniques et de durabilité.

Dans ce mémoire, nous allons parler de la composition du béton fibré, de sa durabilité et ceci pour les différents types de fibres utilisées (métallique, polypropylène et fibre de verre), de la pathologie de ces bétons renforcés par des fibres ainsi que les différentes attaques chimiques et physiques qui peuvent altérer ce matériau et finalement nous allons présenter quelques résultats expérimentaux qui ont été obtenus par des chercheurs pour différents types de bétons (avec et sans l'ajout de fibre) concernant la résistance à la compression et la perte de masse.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le chapitre 01 présente un état de l'art sur les bétons et leur constituants, les types de fibres qui existe, l'utilisation de chaque type de fibre et comment fabriquer un béton renforcé par des fibres.

Le chapitre 02 est consacré à la durabilité et quelques pathologies des bétons renforcés par des fibres (métallique, polypropylène et fibre de verre).

Dans le chapitre 03, nous rassemblons quelques résultats obtenus sur la résistance à la compression et la perte de masse des travaux antérieures effectués par certains auteurs.

Enfin, une conclusion générale qui propose une synthèse des résultats obtenus et les recommandations.

Chapitre 01 : Matériaux cimentaires fibrés

1.1. Introduction :

Ce premier chapitre consiste en une présentation bibliographique qui se compose de deux parties.

Dans la première partie nous allons parler des différents constituants des bétons tout en se focalisant sur le rôle de chacun d'entre eux, ensuite, nous allons détaillés les différents types de fibres qui existes.

La deuxième et dernière partie de ce chapitre se rapporte à la fabrication des bétons fibrés. Ce point d'étude est essentiel actuellement pour connaitre les différentes étapes à suivre pour une bonne formulation de béton fibré.

1.2. Constituants des bétons :

1.2.1. Généralités sur le béton :

Le béton est devenu irremplaçable dans la construction pour des raisons économiques et techniques. Simple en apparence, il est en fait très complexe, avec des utilisations et des méthodes de formulation différentes. C'est le matériau le plus utilisé au monde : environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés chaque année [6].

Les méthodes de production du béton sont adaptées à la nature du chantier et au type de béton à réaliser. Le béton est principalement produit dans les centrales à béton, les usines de construction et dans les bétonnières pour les petits chantiers de construction.

La préparation d'un béton adapté à sa destination consiste, à partir d'études graphiques ou expérimentales, à déterminer et optimiser la composition granulaire et le dosage des différents constituants.

Comme les roches naturelles, le béton a une résistance élevée à la compression et une faible résistance à la traction. C'est pourquoi son utilisation comme matériau de construction, qui remonte aux Romains, ne s'est vraiment développée qu'avec l'invention du béton armé. Dans ce dernier, des renforts, c'est-à-dire des barres d'acier (**initialement en fer**), compensent sa résistance à

la traction insuffisante.

1.2.2. Les constituants :

Le béton est composé de ciment, de granulats (sable et gravillons), d'eau, avec, éventuellement, une addition minérale, un ou plusieurs adjuvants, des colorants, des fibres. Dans tous les cas, une certaine quantité d'air est présente dans le béton. Sa composition variant en fonction des différents constituants utilisés ainsi que leurs proportions dans le mélange [1].

• Ciment :

Ce composant reste essentiel pour un béton de qualité. Le ciment donne un excellent liant hydraulique idéal pour coller ensemble les autres composants du béton. Le ciment provient de la combinaison de calcaire en poudre et d'argile. C'est à l'aide de cette substance qu'en générale le béton acquiert sa plus grande force et sa résistance [2].

Il existe cinq grandes catégories de ciments courants reconnus par la norme européenne EN 197-1 : [3]

- ✓Le CEM I : (**ciment Portland**) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.
- ✓Les CEM II A ou B : (**ciment Portland composé**) ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- ✓Les CEM III A, B ou C :(**ciment de haut-fourneau**) sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- ✓Les CEM IV A ou B :(**ciment de type pouzzolanique**) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques. Absents en France.
- ✓Les CEM V A ou B : (**ciment composé**) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants.

•L'eau :

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle permet l'hydratation du ciment et d'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité (**consistance et viscosité**) et un bon compactage du béton [4].

L'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. La quantité d'eau

utilisée ou plus précisément le rapport E/C à une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure et la cinétique de l'hydratation. Un rapport E/C affecte la qualité du béton non seulement sur le plan de la stabilité mais aussi sur le plan mécanique.

• **Les granulats :**

Les granulats (**agrégats**), d'origine naturelle, artificielle ou recyclée, sont des grains minéraux de dimensions variables comprises entre 0 et 125mm. Ils forment l'ossature, le squelette du béton (sables et gravillons) (Figure 1.1) et occupent 70 à 80% environ du volume de ce dernier [NF P 15-010]. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis des autres composants du béton. On distingue différentes sortes de granulats : les fillers, les sables, les graves, les gravillons (**appelé aussi gravier ou cailloux**) et les ballasts.

Les types des gros granulats : [5]

✓ En fonction de leur masse volumique réelle :

-Granulats légers.

-Granulats courants.

-Granulats lourds.

✓ En fonction de leur origine :

-Les granulats naturels.

-Les granulats artificiels.

✓ En fonction de la forme de leurs grains :

-Les granulats concassés.

-Les granulats roulés.



Figure 1.1 : Photos des différents types de granulats.

On classe les différents types de granulats en fonction de leurs dimensions, exprimées par la formule d/D (Tableau 1.1) [3].

Tableau 1.1: Les différents types des granulats et leur Caractéristiques.

Types	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	$0/D$	$D < 2\text{mm}$
Sables	$0/D$	$D \leq 4\text{mm}$
Graves	$0/D$	$D \geq 6,3\text{mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$
Ballasts	d/D	$d = 25\text{mm}$ et $D = 50$ ou 63mm

•Les adjuvants :

Ce sont des produits chimiques qui sont ajoutés au béton frais en petites quantités (**moins de 5% de la masse du béton**) pour améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la

masse du béton.

La conformité des adjuvants pour béton est régie par la norme NBN EN 934-2.

Il existe plusieurs catégories d'adjuvants selon la norme suscitée :

Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton:

✓ Plastifiants -Réducteurs d'eau :

Les plastifiants sous forme liquide ou de poudre sont utilisés pour faciliter la maniabilité du béton en le rendant plus souple et plus lisse.

Les plastifiants permettent également de réduire la teneur en eau du béton tout en conservant la même ouvrabilité. Cette réduction de l'eau augmente sa durabilité et sa résistance mécanique.

✓ Superplastifiants-Haut réducteurs d'eau :

Les superplastifiants permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné (**réducteur d'eau élevé**), ou, sans changer la teneur en eau, d'augmenter considérablement l'affaissement / étalement ou de produire les deux effets en même temps.

Adjuvants modificateurs de prise et de durcissement du béton:

✓ Accélérateurs de prise :

Les accélérateurs de prise sont principalement utilisés en cas de basses températures empêchant ou gênant la prise du béton. Ils permettent de travailler la matière jusqu'à -10 ° C. Des accélérateurs sont recommandés pour éviter que les basses températures ne bloquent la prise du béton, ne l'interrompent pas en le transformant en glace lors de la prise, ou pour accélérer sa montée en résistance. Ils sont utilisés pour les articles épais ou volumineux qui sont particulièrement sensibles au gel en raison d'un réglage plus long.

✓ Accélérateurs de durcissement :

Ces additifs augmentent la vitesse de développement de la résistance initiale du béton, avec ou sans modification du temps de prise. Il est préférable de les utiliser par temps froid.

✓ Retardateurs de prise :

Un béton contenant un retardateur de prise fait ralentir le durcissement du béton afin que ce dernier soit toujours manipulable sur chantier.

Ils sont utiles par temps chaud pour éviter que le béton ne durcisse trop vite ou lors du transport de béton sur de longues distances. Lorsque les conditions de mise en place sont difficiles ou longues, ils permettent d'effectuer celle-ci ou de faire une reprise plus facilement.

Autres catégories normalisées d'adjuvants:

✓ Hydrofuges de masse :

La fonction principale des hydrofuges en vrac est de réduire la porosité du béton. Ils agissent sur les pores du béton en les colmatant. Ils sont utilisés dans des environnements agressifs ou dans la construction d'installations telles que fondations, radeaux, piscines, etc. Les hydrofuges en vrac se présentent sous forme de poudre ou de solution aqueuse.

✓ Rétenteurs d'eau :

Ces adjuvants réduisent le départ d'eau par saignement et augmentent l'homogénéité et la stabilité du mélange. Ils sont utilisés dans le béton coulé sous l'eau ou certains bétons auto-consolidants.

✓ Entraîneurs d'air :

Leur rôle est de créer des bulles d'air microscopiques dans le béton. Ils lui permettent de mieux résister au gel et surtout aux cycles de gel / dégel.

Règles générales pour l'utilisation des adjuvants : [7]

Bien que les adjuvants fournissent généralement de bonnes performances, il ne faut jamais ignorer le fait qu'ils introduisent de la complexité dans le système ciment-eau-agrégat. C'est pourquoi toute utilisation d'adjuvants nécessite beaucoup d'attention de la part de l'interprète:

- Le mélange de certains adjuvants peut provoquer des effets indésirables. L'utilisation d'adjuvants de différents fabricants augmente le risque.
- Sauf indication contraire, lorsque le mélange a été correctement humidifié, l'adjuvant doit être ajouté au mélangeur après avoir mélangé l'eau.
- Les additifs doivent être stockés dans une pièce protégée du gel et de la lumière directe du soleil. La date d'expiration doit être respectée et les adjuvants qui ont déjà été échelonnés ne doivent pas être utilisés.

•Les additions minérales :

Différents additifs peuvent être mélangés avec du ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [Nguyen, 2007]. Les principaux additifs utilisés dans le domaine du béton sont les charges de calcaire, les fumées de silice, la pouzzolane naturelle, les scories de haut fourneau et les cendres volantes. Ces additifs minéraux donnent au béton frais une meilleure maniabilité, augmentent la cohésion et réduisent le suintement et la ségrégation du béton [El Barrak, 2005]. D'autre part, l'ajout de ces minéraux améliore

également l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [Lapointe, 1997] [8].

Types d'additions : [9]

Addition type I (Les ajouts minéraux inertes) selon la norme EN 206-1 :

- ✓ Les additions calcaires (NF P 18-308).
- ✓ Les additions siliceuses (NF P 18-509).
- ✓ Les fillers (NF P 18-501).

Propriétés des additions inertes :

Les fillers calcaires:

Le terme filler fait référence à tout produit obtenu par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, kieselguhr, bentonite...) naturelles ou non. L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais et du béton durci.

Cependant, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides).

Addition type II (Les ajouts minéraux actifs) selon la norme EN 206-1 :

- ✓ La fumée de silice (NF P 78-502).
- ✓ Les cendres volantes de houille (NF P 18-505).
- ✓ Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506).
- ✓ La pouzzolane (EN 197-1).

Propriétés des additions réactives :

La fumée de silice :

Les fumées de silice sont des particules très fines (taille moyenne des graines environ 1µm) avec une très forte teneur en silice amorphe (plus de 90%). Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les

fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium.

Une bonne dispersion, permet aux particules de la fumée de silice de se placer entre les interstices des grains de ciment, diminuant ainsi la quantité d'eau nécessaire au mélange. L'utilisation de la fumée de silice conduit à des bétons extrêmement compacts à caractéristiques mécaniques élevées et une résistance nettement renforcée vis-à-vis des milieux agressifs.

Le laitier de haut fourneau:

Le laitier de haut fourneau est un matériau qui comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker. C'est un matériau hydraulique latent, est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il subit une activation convenable.

Les cendres volantes:

Les cendres volantes, pouzzolanes d'origine industrielle, sont des produits pulvérulents qui proviennent du dépoussiérage des gaz de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, et composées essentiellement de SiO_2 et de Al_2O_3 ; la proportion de SiO_2 réactive constituant au moins 25 % de la masse.

Les pouzzolanes :

Sont un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement ou artificiellement (subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques).

•Les fibres :

Les fibres constituent un obstacle à la formation et la propagation des fissures qui causent l'endommagement de la structure.

Les fibres s'ajoutent donc pour permettent au béton d'acquérir une résistance post-fissuration accrue et une plus grande capacité de déformation.

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (**microfibres ou macrofibres**), leur forme (droite, ondulée, aiguille,...etc.), et leur état de surface.

Les fibres sont ajoutées idéalement à la centrale à béton pour une parfaite homogénéité de leur distribution et orientation.

Différentes familles de fibres : Chaque famille représente différents types de fibres:

Les fibres métalliques :

- ✓ Acier (Figure 1.2).
- ✓ Fonte.
- ✓ Inox.



Figure 1.2 : Types de fibres d'acier (Grueward et al. 2004) [12].

Les fibres organiques :

- ✓ Acrylique.
- ✓ Aramide.
- ✓ Carbone (Figure 1.3).
- ✓ Kevlar.
- ✓ Polyamide Polypropylène/Polyéthylène.
- ✓ Polypropylène (Figure 1.4).

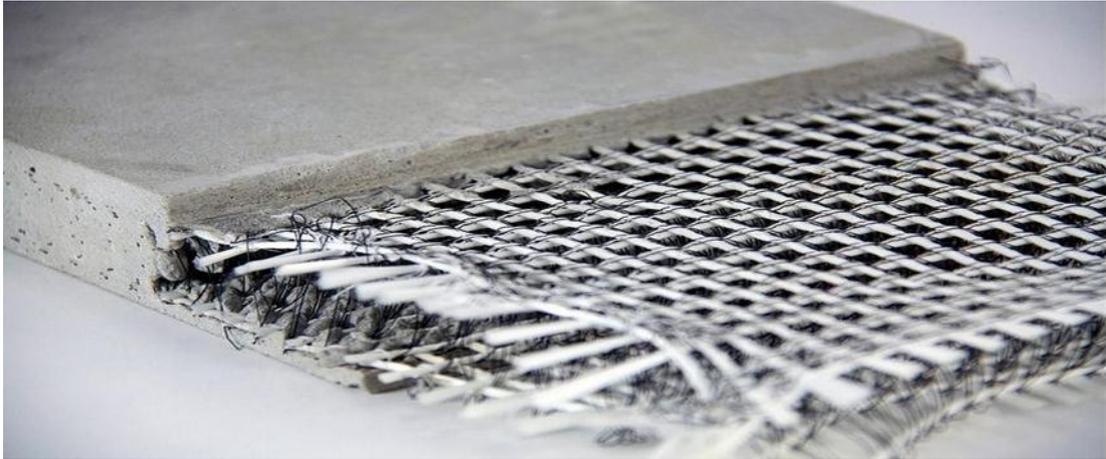


Figure 1.3 : Fibres de carbone dans le béton (Grueward et al. 2004) [12].



Figure 1.4 : fibres en polypropylène (Grueward et al. 2004) [12].

Les fibres minérales :

- ✓ Basalte.
- ✓ Mica.
- ✓ Verre (Figure 1.5).
- ✓ Wollastonite.



Figure 1.5 : Fibres de verre.

Les fibres végétales :

- ✓ Lin.
- ✓ Chanvre (Figure 1.6).
- ✓ Celluloses.
- ✓ Sisa.
- ✓ Coton.



Figure 1.6 : Fibres de Chanvre (Grueward et al., 2004) [12].

Les fibres Animales :

- ✓ Poil.
- ✓ Laine.
- ✓ Soie.

Rôles des fibres dans le béton :

Les fibres sont généralement utilisées pour renforcer ou remplacer l'action des renforts traditionnels en empêchant la propagation des microfissures (Figure 1.7). Toutefois, les chercheurs ont tenté d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton, telles que la résistance à la compression et à la flexion, en ajoutant les fibres [10].

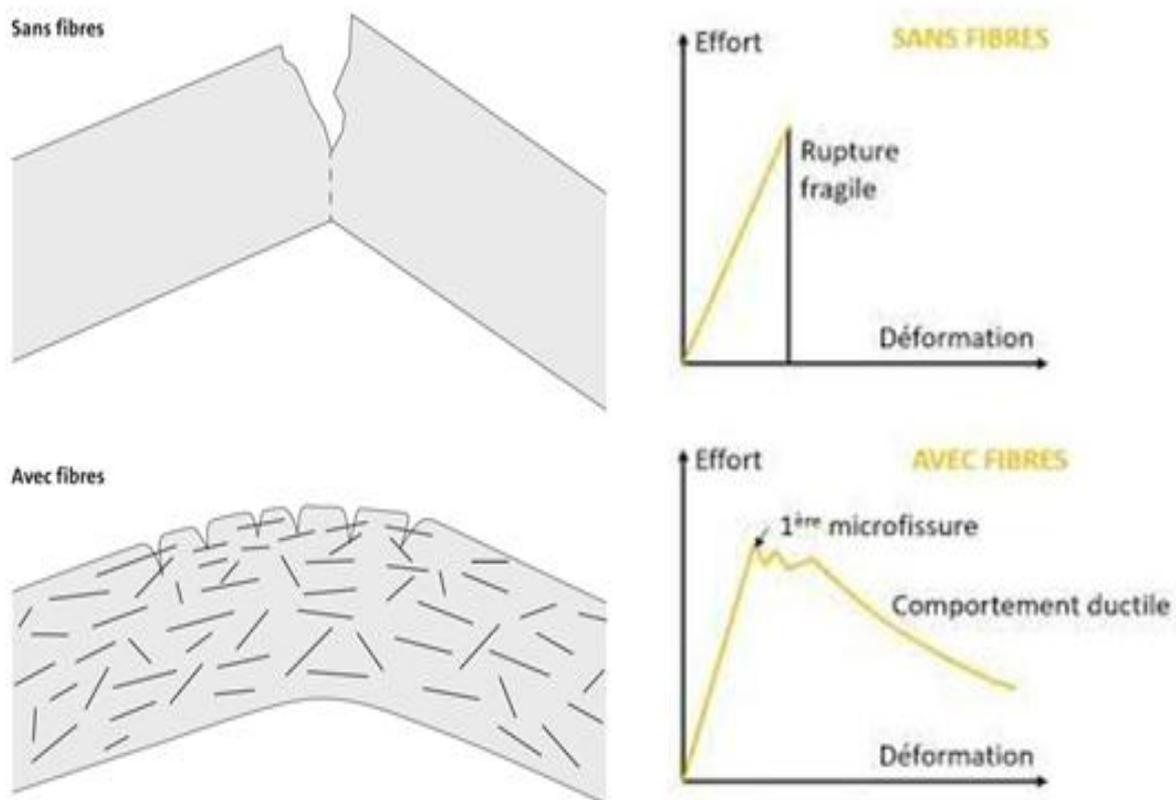


Figure 1.7: Rôle des fibres dans la matrice du béton [10].

Le tableau 1.2 ci-dessous résume les différentes applications des fibres en pratique.

Tableau 1.2. : Type de fibre et domaine d'application

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince de béton, enduit pour blocs de béton.
Acier	Éléments de toiture en béton cellulaire, revêtements de chaussée, tabliers de pont, produits réfractaires, tuyaux en béton, pistes d'atterrissage, réservoirs sous pression, structures résistantes aux explosions, revêtements de tunnel, coques de bateaux.
Polypropylène, nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, éléments flottants de débarcadères et amarres pour les marinas, matériaux de réparation des routes, couches de lest pour les tuyaux sous-marins.
Amiante	Voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et de protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toiture plates et ondulées, revêtements de mur.
Carbone	Éléments ondulés pour la construction des planchers, structures de membrane simple ou double courbure, coques de bateaux, planches d'échafaudage.
Particules de mica	Remplacent partiellement l'amiante dans les panneaux à base de ciment, les tuyaux en béton ; matériaux de réparation.

Il est a été noter que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut être évalué de deux manières:

Conversion du comportement fragile du matériau en un comportement ductile qui augmente la sécurité dans les conditions de charge finale.

Contrôle de la propagation des fissures dans les matériaux utilisables en réduisant l'ouverture des fissures.

Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent : [11]

La cohésion du béton frais.

La déformabilité avant rupture.

La résistance à la traction par flexion.

L'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration

La résistance aux chocs.

La résistance à la fatigue.

La résistance à l'usure.

La résistance mécanique du béton aux jeunes âges.

La réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures.

L'amélioration de La tenue au feu.

La résistance à l'abrasion.

La réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur).

1.3. Fabrication des bétons fibrés :

1.3.1. Le béton de fibres :

Le béton avec fibres est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Elles portent aussi le nom de microfibres.

Les microfibres peuvent être utilisées quand on souhaite réduire la fissuration et améliorer la durabilité. Et elles conviennent particulièrement bien aux dalles sur le sol, dalles surélevées, pavages, piscines, trottoirs, béton projeté etc.

Comme armatures secondaires elles sont utilisées pour assurer le contrôle de la fissuration, elles constituent une solution idéale lorsqu'elles sont combinées au ferrailage en acier. Ces fibres ne sont pas recommandées pour remplacer l'armature exigée par les codes et les normes du bâtiment.

Les propriétés de ces fibres sont étonnantes. En effet, leur force majeure est leur capacité à diminuer le retrait plastique et les fissures d'environ 40% et plus.

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant, les fibres sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élancement et la teneur en volume de fibre.

1.3.2. Historique du béton de fibres :

Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. En effet, les pharaons ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1^{ère} fois, les fibres d'amiante dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années. D'autres sources ANTOINE, E.N - Mars 1985 et ACI COMMITTEE 554 Mars- Avril 1984 ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, il existe aussi, les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX^e siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone [23].

En 1910, une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J. PORTER (1910) qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction.

Par la suite, GRAHAM (1911) a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet Américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction. Un deuxième brevet Américain sur ce sujet a été pris par WEAKLY (1912).

En 1920, A. KLEINLOGEL a déposé le premier brevet Allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important, de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1938, un autre brevet a été établi par N. ZITEVIC en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer approximativement de 100 mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très semblables aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement [23].

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres d'acier dans le béton pour améliorer sa performance. Mais on note ici que celui de G. CONSTANTINESCO, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, mérite une attention particulière [24].

A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la

technologie des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Le premier article dans ce concept peut être attribué à LANKARD et SHEETS (l'année). Dans cet article, ils ont confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance [25].

1.3.3. Formulation des BFM :

L'optimisation de la composition des BFM est un passage obligé dans l'ingénierie de ce matériau. La formulation de ces matériaux ne peut pas, et ne doit pas se résumer, à l'introduction directe d'un certain pourcentage de fibres, dans un béton ayant été préalablement optimisé sans fibres. En effet, cette introduction perturbe l'arrangement granulaire de la matrice, ce qui a pour double conséquence de diminuer la maniabilité du matériau et d'altérer sa compacité. Il est évident que cette perturbation est d'autant plus importante que le pourcentage de fibres est élevé, et que pour des dosages « homéopathiques », c'est-à-dire, comportant au moins 50 kg/m^3 de fibres, il est impératif de reformuler la matrice [14].

1.3.4. Objectifs d'une formulation : [13]

Les performances requises pour un béton impliquent :

Une consistance adaptée à sa destination, généralement définie par l'affaissement au cône d'Abrams, noté ici A_{ff} ;

Des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours ; onnotera f_{c28} cette résistance ;

Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment C_{min} et un rapport E/C maximum (E/C) max .

La formulation du béton doit permettre de respecter les deux premières exigences au moindre coût, et le plus souvent à partir d'un dosage en ciment C le plus faible possible tout en vérifiant $C \geq C_{min}$.

1.3.5. Description de la méthode de formulation des bétons :

Il s'agit de la méthode Baron –Lesage [14] qui a été développée au Laboratoire central des ponts et chaussées, il y a une quinzaine d'année, pour optimiser le squelette granulaire des bétons non fibrés. Cette méthode est fondée sur trois

hypothèses principales largement vérifiées par l'expérience.

Pour un rapport eau/liant fixé au départ, le béton le plus maniable est celui qui a le squelette granulaire (G+S) le plus compact ;

Les proportions optimales en granulats dépendent peu de la nature et du volume du liant ;

L'introduction des fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

De manière pratique, la méthode se décompose en trois étapes :

1/ Le cahier des charges d'un BFM permet généralement de fixer :

Le rapport eau / liant ;

Le diamètre du plus gros granulat ;

Le pourcentage de fibres ;

La maniabilité souhaitée.

2/On fait varier le rapport massique S/S+G (S : sable, G : granulats) et on détermine pour chaque valeur de ce rapport la maniabilité correspondante. On trace alors la courbe maniabilité en fonction du rapport S/S+G et on détermine le rapport optimal qui correspond à la meilleure maniabilité.

3/Si la maniabilité correspondant à l'optimum du squelette minéral est différente de la maniabilité fixée par le cahier des charges, il suffit alors soit d'augmenter ou de diminuer le volume de liant, soit d'ajouter un super plastifiant, s'il n'y en avait pas initialement, ou d'en augmenter ou d'en diminuer la quantité, pour atteindre cette maniabilité souhaitée.

On note aussi que :

La maniabilité peut se déterminer suivant différentes méthodes expérimentales. Ainsi, il existe divers appareils qui permettent de déterminer, au travers de paramètres différents, cette maniabilité. L'objectif, ici, n'est pas de réaliser une présentation exhaustive de ces appareils, mais d'évoquer les deux plus connus et les plus utilisés en France, en l'occurrence le cône d'Abrams et le maniabilimètre LCL :

Le cône d'Abrams peut être qualifié d'essai « statique », puisqu'il met en évidence l'aptitude du béton à se mettre en place sous l'effet de la pesanteur. La maniabilité y est caractérisée par un temps d'écoulement.

Le maniabilimètre LCL est, quant à lui, un essai « dynamique » qui met en

évidence l'aptitude du béton à se mettre en place sous vibration. La maniabilité est alors caractérisée par un temps d'écoulement.

Dans le cas des BFM, il est préférable d'utiliser le second appareil.

Il a été dit que la maniabilité souhaitée s'obtient, soit en ajustant la quantité de liant, soit en faisant varier la quantité de superplastifiant.

L'étude de la composition du béton de fibre est complexe. Elle a été peu étudiée dans son ensemble jusqu'à présent. Il ne suffit pas d'ajouter un certain pourcentage de fibres à une composition courante de béton. En effet, les fibres modifient considérablement l'ouvrabilité d'un béton (Figures 1.8 et 1.9). Ainsi, la baisse d'ouvrabilité est d'autant plus importante :

que le rapport l/d (longueur/diamètre des fibres) est grand ;

que le diamètre du plus gros granulats est grand ;

que le pourcentage de fibre est élevé.

Sur les figures 1.8 et 1.9 nous avons respectivement :

W'_p c'est le pourcentage en poids de fibre de polypropylène par rapport au poids sec des constituants ;

V°_f c'est le pourcentage en volume des fibres (acier et polypropylène) dans le béton, $V^{\circ}_f = 2.0 W'_p / 0.95$.

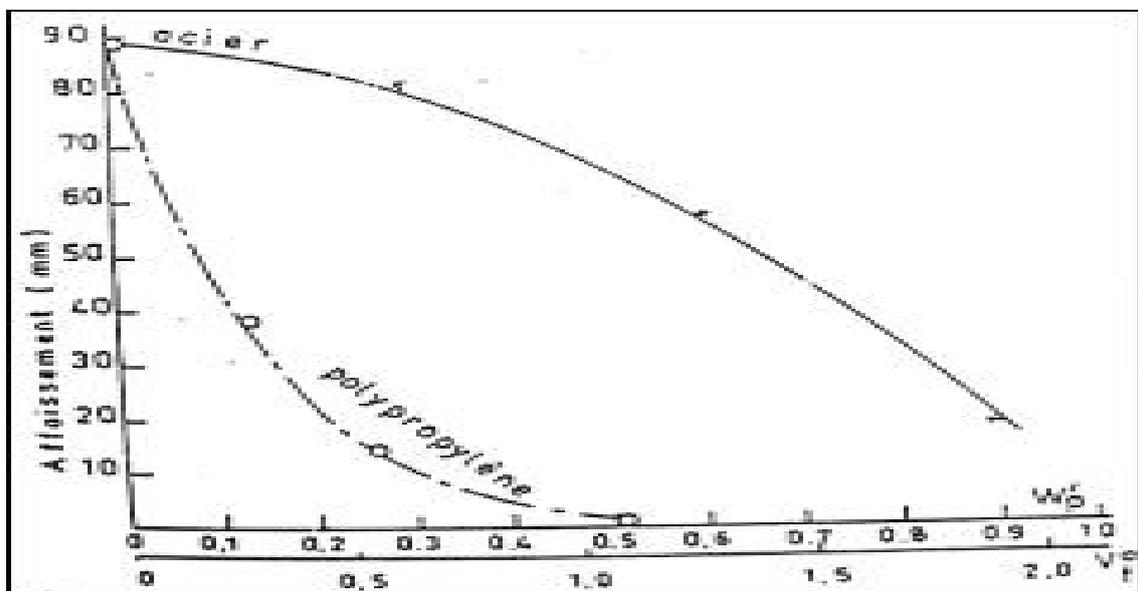


Figure 1.8 : Effet des fibres incorporées dans un béton sur son affaissement [16].

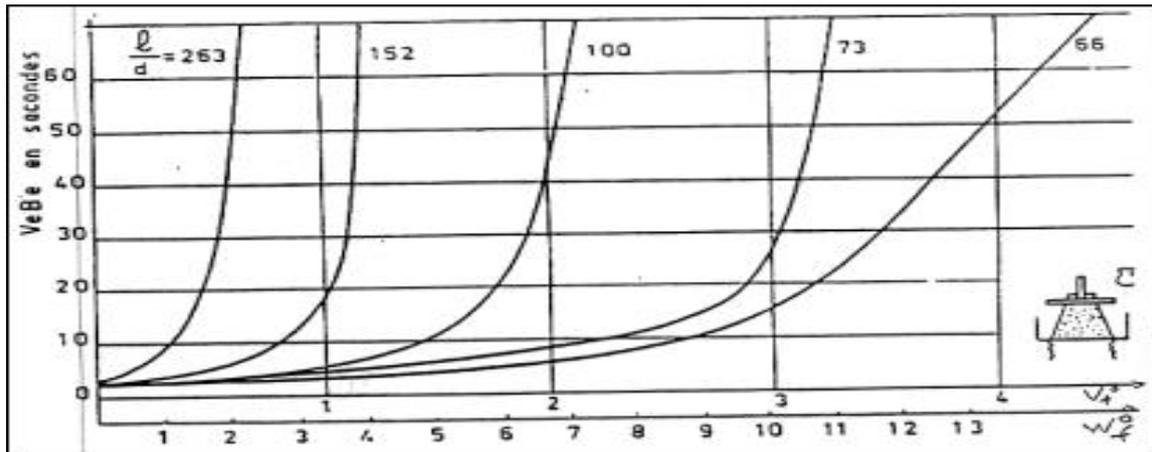


Figure 1.9 : Effet de la teneur en fibres d'acier et de leur élancement sur l'ouvrabilité Ve-Be [15].

Plusieurs auteurs, dont Dehousse [84] conseillent de limiter le rapport $G/(G+S)$ à 0.5, G étant le poids du gravillon (grains $>5\text{mm}$).

D'après ce même chercheur, la granulométrie du béton doit être étroitement liée à la dimension des fibres et les granulats doivent être de dimension telle qu'un encadrement par des fibres soit possible (Figure 1.10). Compte tenu de cela, il faut limiter la grosseur des granulats et les bétons armés de fibres sont plutôt des microbétons surdosés en grains au dessus de 5 mm et des mortiers (Figure 1.11) [16].

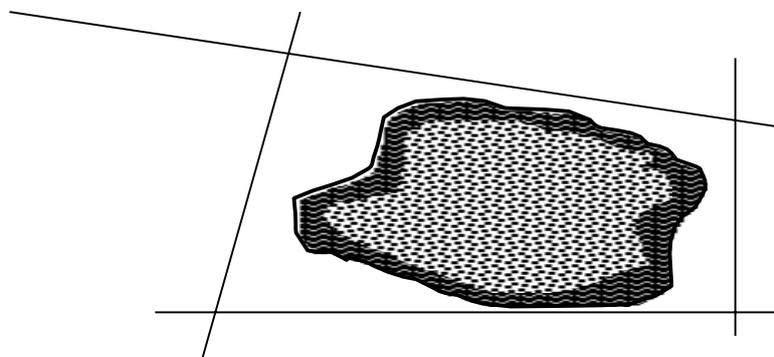


Figure 1.10 : Encadrement d'un granulat [16].

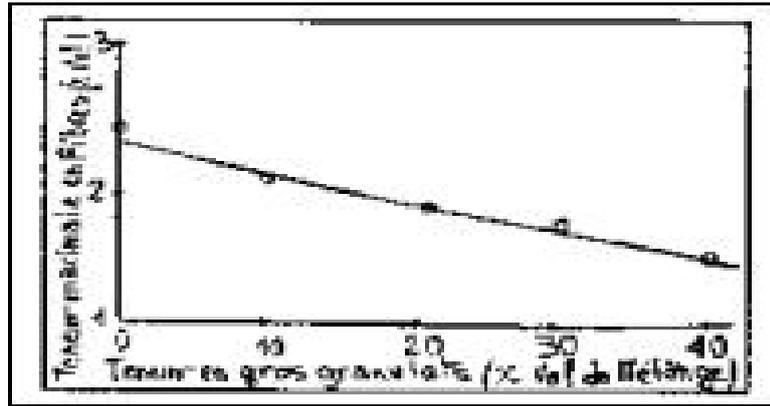


Figure 1.11 : Teneur maximale en fibres en fonction de la teneur en gros granulats [16].

Le comité des grands barrages aux Etats-Unis (Uscold) [17] recommande certains fuseaux granulométriques pour les mortiers 0/5, les bétons fins 0/9, ou les bétons moyens 0/19. Les teneurs optimales en fibres, qu'il préconise, sont les suivantes (en volume) :

1.5 à 2% pour les pâtes de ciment ;

1.5 % pour les mortiers 0/5 ;

1.25 % pour les bétons fins 0/9.5 ;

1% pour les bétons moyens 0/19.

Une étude complète sur la formulation des bétons de fibres d'aciers a été faite par Serna Ros [18] au LCPC. Sa méthode lui permet de déterminer un squelette minéral optimal. Sa méthode est dérivée de celle de Baron Lesage et elle utilise le module de finesse. (Le module de finesse est le centième de la somme des refus, en pour cent et en poids, sur les tamis 0.080- 0.16 - 0.315 – 0.630 – 1.250 – 2.5 – 5 – 10 – 20 – etc...). Connaissant le module de finesse de la composition et celui de chacun des composants, il est possible de calculer leurs proportions. Serna Ros a ainsi étudié les variations de l'affaissement au cône d'Abrams, en fonction du module de finesse (Figure 1.12) et a ensuite étudié les modifications provoquées par la présence des fibres. Il a ainsi constaté que, pour obtenir la composition optimale, le module de finesse devait être d'autant plus faible que le pourcentage de fibres était grand.

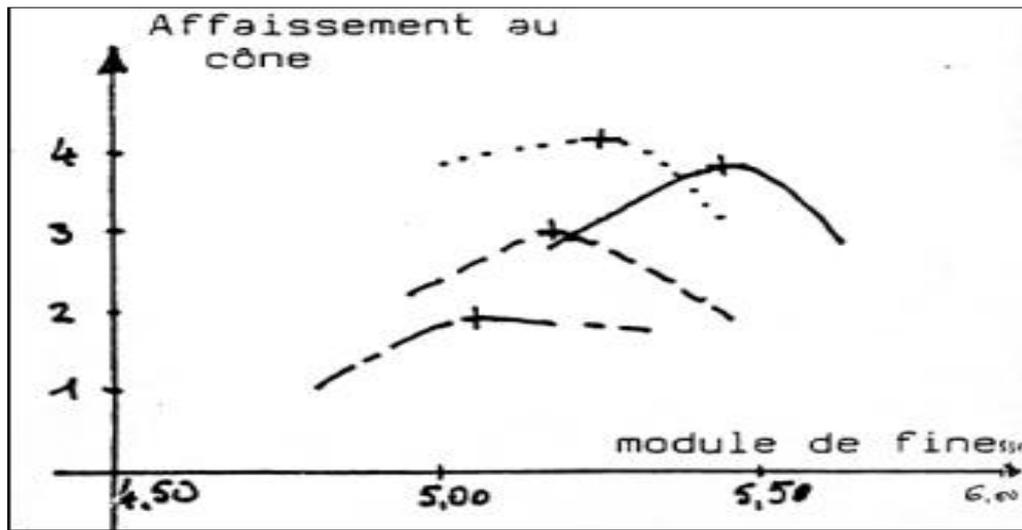


Figure 1.12 : Affaissement au cône en fonction du module de finesse [18].

En reportant sur une courbe le pourcentage de fibres en fonction des modules de finesse correspondant à la maniabilité maximale, Serna Ros (1984) a observé que, pour chaque type de béton ces points étaient alignés (Figure 1.13), à condition que le pourcentage des fibres reste inférieure à 1.5 %. De plus, les droites sont concourantes en un point et correspondent à un module de finesse de 5.16 et à un dosage en fibre de 1.8 %. Ainsi, connaissant la granulométrie de deux granulats, on peut déterminer la composition optimale du béton sans fibres par la méthode Baron- Lesage, en déduire le module de finesse correspondant (m_{is}) et en joignant ce point (sur l'axe des abscisses) au point 0, on obtient le module de finesse pour les différents dosages en fibres.

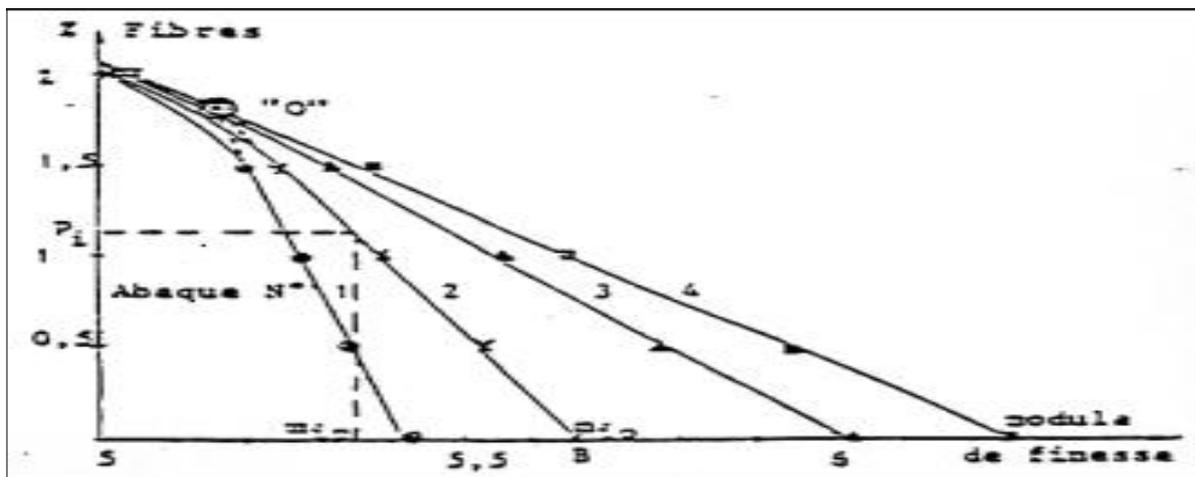


Figure 1.13 : abaques reliant la composition granulaire optimale du béton au pourcentage en fibres [18].

L'étude de Serna Ros [18] porte aussi sur les limites de maniabilité des bétons de fibres. En effet, lorsque l'on augmente le dosage en eau d'un béton de fibres, on arrive rapidement à un affaissement au cône limite (Figure 1.14).

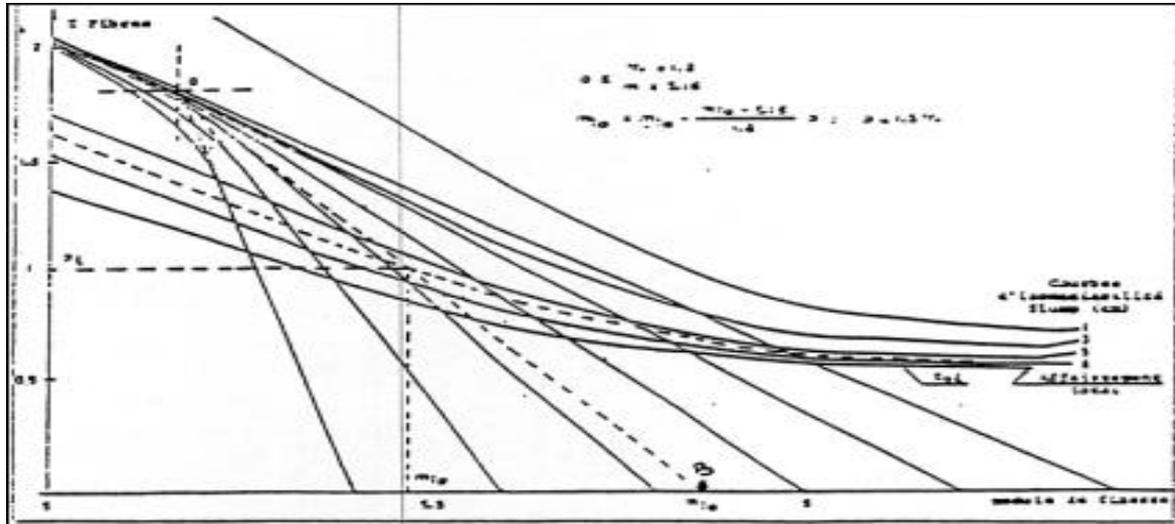


Figure 1.14 : Abaque permettant d'établir une formulation de béton de fibres [18].

Ces résultats rejoignent ceux obtenus par MOENS [17]. Il est ainsi possible, à partir d'un module de finesse et d'un dosage en fibres, de déterminer la valeur limite supérieure de l'affaissement au cône du béton correspondant.

Les conclusions de l'étude de Serna Ros (1984) sont les suivantes :

- pour des bétons ayant un faible module de finesse (béton de petits granulats) il est possible d'ajouter des fibres jusqu'à 1 % (en volume) sans précaution particulière, et jusqu'à 2 % et plus, en contrôlant bien la fabrication, avec plus de 1 % de fibres, une faible variation du dosage en eau provoque la formation de pelote de fibres (oursin).
- pour des bétons ayant un module de finesse élevé (béton de gros granulats) il faut limiter la teneur en fibres à 0.5 ou 0.6 % (en volume). Avec des dosages voisins de 0.5 ou 0.6%, tout excès de fibres risque d'entraîner la formulation d'oursin.

1.3.6. Fabrication de béton de fibres :

Avant de mélanger le béton, la longueur des fibres, leur quantité et la composition du mélange sont choisies pour éviter la formation de boules de

fibres. Dans les mélanges renforcés, le mortier occupe d'habitude environ 70% du volume, contre 50% pour les mélanges de béton courants, non renforcés de fibres.

Le malaxage du béton de fibres est important. En effet, il faut veiller à obtenir une bonne dispersion des fibres dans le mélange et éviter la formation de boules de fibres.

Le Comité 544 de l'ACI [19] recommande plusieurs méthodes suivant la nature des fibres utilisées, les matériaux recherchés :

a/ Mélanger les fibres et les granulats avant l'introduction dans le malaxeur (par exemple ajouter les fibres sur le tapis roulant d'alimentation des granulats) ;

b/ Mélanger d'abord les gravillons et le sable, ajouter les fibres, puis le ciment et l'eau. Cette méthode est recommandée pour les fibres de polypropylène, de façon à les défibrilliser [Dardare] [20].

c/ Ajouter les fibres en fin de malaxage et adopter un temps de malaxage minimum pour obtenir la répartition homogène.

Des adjuvants chimiques sont ajoutés au mélange de béton renforcé de fibres, notamment pour augmenter son ouvrabilité. En Amérique du Nord, les entraîneurs d'air et les réducteurs d'eau sont ordinairement additionnés aux mélanges qui contiennent une proportion de 50 % ou plus de granulats très fins.

Les superplastifiants incorporés à des bétons renforcés de fibres peuvent abaisser le rapport eau/ciment et améliorer la résistance, la stabilité volumétrique et l'ouvrabilité des mélanges frais.

Pour les fibres métalliques, le Comité 544 de l'ACI [17] conseille d'ajouter les fibres sous forme de pluie, en les faisant passer à travers un tamis munis d'un vibreur. Pour éviter ces complications la Société BEKAERT propose des fibres collées ensemble par paquets à l'aide d'un produit qui se dissout dans l'eau de gâchage, on peut ainsi ajouter les fibres au mélange sans précautions particulières.

Le transport du béton de fibres peut se faire en général avec des malaxeurs classiques, en prenant la précaution de charger le camion à une capacité inférieure au maximum, car il faut plus d'énergie pour malaxer un béton de fibres que pour malaxer un béton classique.

Les panneaux en ciment renforcé de fibres ne contiennent pas de granulats grossiers. Ces produits sont généralement réalisés en projetant simultanément

le mortier et les fibres hachées. Un mortier ayant un rapport eau/ciment élevé facilite la projection. Il existe d'autres méthodes de fabrication, dont le coulage, moins universel que la projection, et le moulage sous pression, où le rapport eau/ciment moins élevé permet d'obtenir un produit plus résistant.

1.3.7. Procédures de mélange :

Le processus de fabrication du béton renforcé avec fibres (Figure 1.15) est le même que celui du béton ordinaire sans fibres. Le mélange de ce dernier est réalisé en trois étapes. Tout d'abord, le ciment est ajouté aux granulats et le tout est mélangé à sec pendant 30 s.

Ensuite, 60 % de l'eau nécessaire a été ajoutée et le matériau a été mélangé pendant 1 minute, puis le reste de l'eau contenant le superplastifiant a été ajouté et le matériau a été mélangé pendant 1 minute.

A la fin, les fibres d'aciers sont ajoutées et le matériau est mélangé pendant 5 min. Deux minutes de repos sont prises et enfin après cela, le matériau est mélangé pendant 30s. Pour garantir une distribution homogène des fibres à l'intérieur du volume de béton, certaines caractéristiques doivent être vérifiées ; le béton renforcé de fibres doit être capable de remplir la forme avec son poids. En outre, il doit avoir un niveau acceptable de résistance à la ségrégation et être capable de passer à travers les espaces entre les barres d'armature, et enfin, il doit avoir une surface lisse après démoulage [21, 22].

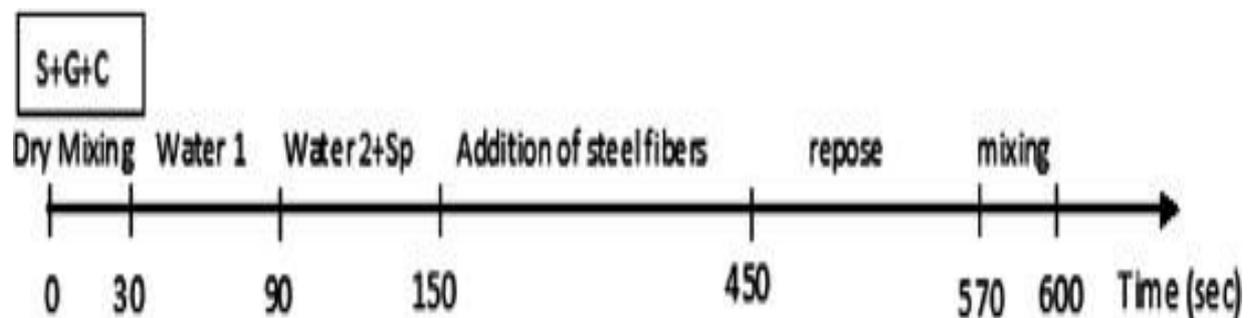


Figure 1.15 : Procédure de mélange pour béton de fibres (1995) [18].

1.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons procédé à un état de l'art sur les bétons et leur constituants, les types de fibres qui existent, l'utilisation de chaque type de fibre, comment fabriquer un béton renforcé par des fibres, la méthode de fabrication ainsi que les procédures de mélange.

Dans le chapitre suivant nous allons parler de la durabilité des bétons renforcés par des fibres.

Chapitre 02 : Durabilité et quelques pathologies observées sur les bétons fibrés

2.1. Introduction :

Dans ce chapitre et à travers une étude bibliographique nous allons présenter notre travail en deux parties. En premier lieu, nous allons commencer par citer des notions générales qui peuvent nous aider à cerner le contexte de notre étude. Ensuite, nous allons nous concentrer sur l'intérêt du renforcement des bétons par des différentes fibres afin de les mettre en valeur et au même titre pour citer leur nombreuses qualités (la durabilité, l'isolation) ; nous nous focalisons de même sur le rôle de chaque constituant de ces types d'additions. On outre, nous allons évoquer les différents types de ces additions lors de leur ajout dans le béton. En Deuxième lieu, nous présenterons les différents résultats de recherche réalisés sur les bétons fibrés, comme leur propriétés (mécanique, thermique, acoustique...etc.).

2.2. Durabilité des bétons renforcés par des fibres métalliques :

2.2.1. Généralités sur les fibres métalliques :

Les fibres métalliques sont largement utilisées et leurs effets sur les propriétés rhéologiques et de durcissement ainsi que sur la durabilité ont fait l'objet de nombreuses études [12].

Les fibres d'acier sont probablement les plus utilisées. Elles ont fait l'objet de plusieurs recherches. A l'origine, les fibres à section rectiligne et circulaire (d'un type identique à celles utilisées pour armer les pneumatiques) ont évolué vers des fibres d'acier en tôle cisailée. Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se distinguent les unes des autres par :

- leurs diamètres
- leur section (ronde, carrée, rectangulaire ...)
- leur longueur et leur mode de fabrication.
- ils peuvent être droits, ondulés ou avoir des élargissements aux extrémités, soit des coudes, soit des crochets pour améliorer la prise.

2.2.2. Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton :

• Résistance en compression :

• Résistance à la compression du béton témoin (BT) à différentes températures :

Les résistances mécaniques ont été obtenues par le calcul de la moyenne des résistances (à 28 jours) des trois éprouvettes cylindriques de béton témoin sans fibres à une température de $(20 \pm 2^\circ\text{C})$. Les résistances et les déformations sont consignées dans le tableau 2.1 et la courbe contrainte-déformation est présentée sur la figure 2.1.

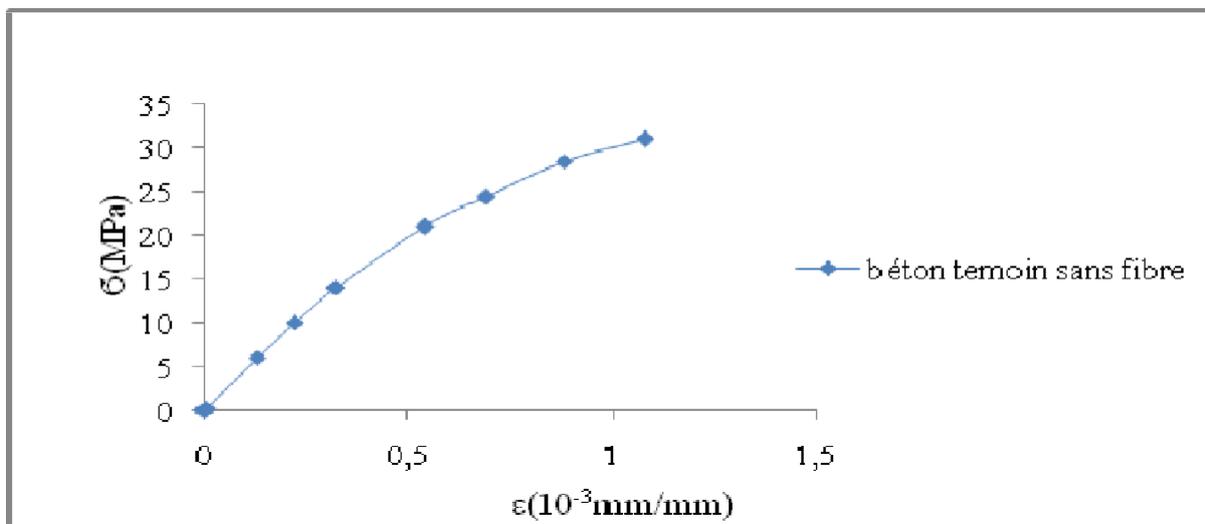


Figure 2.1 : Courbe contrainte-déformation du béton témoin à 20°C [81].

Le comportement de la courbe contrainte-déformation du béton témoin en compression est caractérisé par les phases suivantes :

- Une partie linéaire avant fissuration du béton, située entre 0 et environ 30% de la résistance maximale du béton i.e. jusqu'à 10 MPa et donc une déformation entre 0 et environ 0,26, le matériau dans cette phase étant considéré comme sain, c'est à dire non endommagé, celui-ci est régi par la loi de Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$).
- Une partie courbée, au delà de 10 MPa et jusqu'à la rupture (30,95 MPa) : au cours de cette phase, le béton se fissure au fur et à mesure de l'application du chargement, les microfissures passant de microscopiques à macroscopiques, engendrant un endommagement de plus en plus important ainsi qu'une perte de rigidité menant à la rupture totale du matériau.

Tableau 2.1: Béton témoin sans fibres [81].

force (kN)	$\Delta L \times 10^{-3}$ (mm)	$\varepsilon_L \times 10^{-3}$	σ (MPa)
0	0	0	0
20	4	0,02	2,5
40	130	0,65	5,1
60	235	1,175	7,6
80	350	1,75	10,1
100	430	2,15	12,7
120	525	2,625	15,2
140	607	3,035	17,7
160	710	3,55	20,3
180	820	4,1	22,8
200	985	4,925	25,3
220	1125	5,625	27,8
240	1330	6,65	30,4
260	1500	7,5	30,95

Les courbes contraintes-déformations du béton témoin à différentes températures sont données en figure (2.2) :

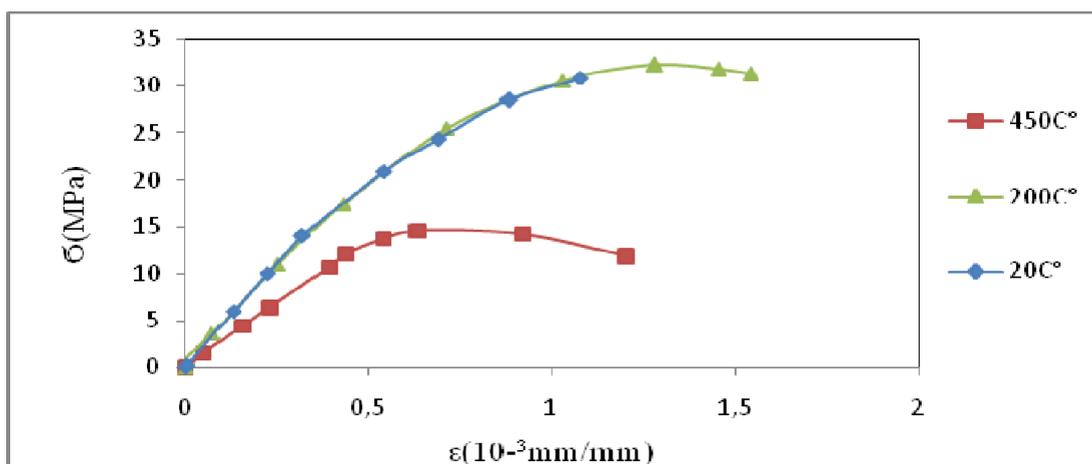


Figure 2.2 : Courbes contraintes-déformations du béton témoin (BT) à différentes températures [81].

La résistance à la compression du béton témoin à différentes températures est caractérisée par :

- à 20°C, $f_{c28} = 30.95\text{MPa}$, pour $\varepsilon = 1.1$.
- à 200°C, une résistance mécanique ultime légèrement supérieure à celle remarquée à 20°C et une partie adoucissante entre $\varepsilon = 1.1$ et $\varepsilon = 1.5$ correspondante a la rupture ductile.
- à 450°C, longue partie ductile jusqu'à $\varepsilon = 1.2$ et diminution de la résistance: $f_{c28} = 14.25\text{MPa}$ pour $\varepsilon = 0.6$.

➤ **Résistance à la compression du béton de fibre métallique (BFM) à différentes températures :**

Les courbes contraintes-déformations du béton de fibres métalliques à différentes températures sont données en figure 2.3 :

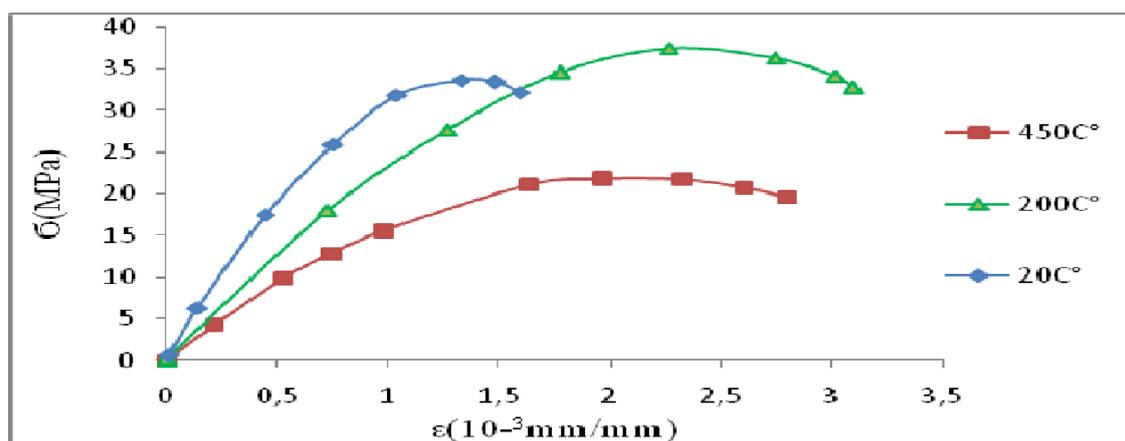


Figure 2.3 : Courbes contraintes-déformations des bétons de fibres métalliques (BFM) à différentes températures [81].

- à 20°C rigidité importante, on remarque sur cette courbe, la présence d'une partie élastique et un palier plastique non conséquent.
- à 200°C et 450°C une amélioration de la déformabilité à environ 2 mm/mm, on remarque une augmentation de la résistance maximale à 200°C (37.4 MPa) et une diminution de la résistance (21.82MPa) à 450°C.

• **Résistance en traction par flexion :**

➤ **Résistance à la traction du béton témoin (BT) à différentes températures :**

Les résultats des essais sur éprouvettes en béton témoin (BT) (sans fibres) à différentes températures sont représentés par les courbes force-déplacement de la figure 2.4.

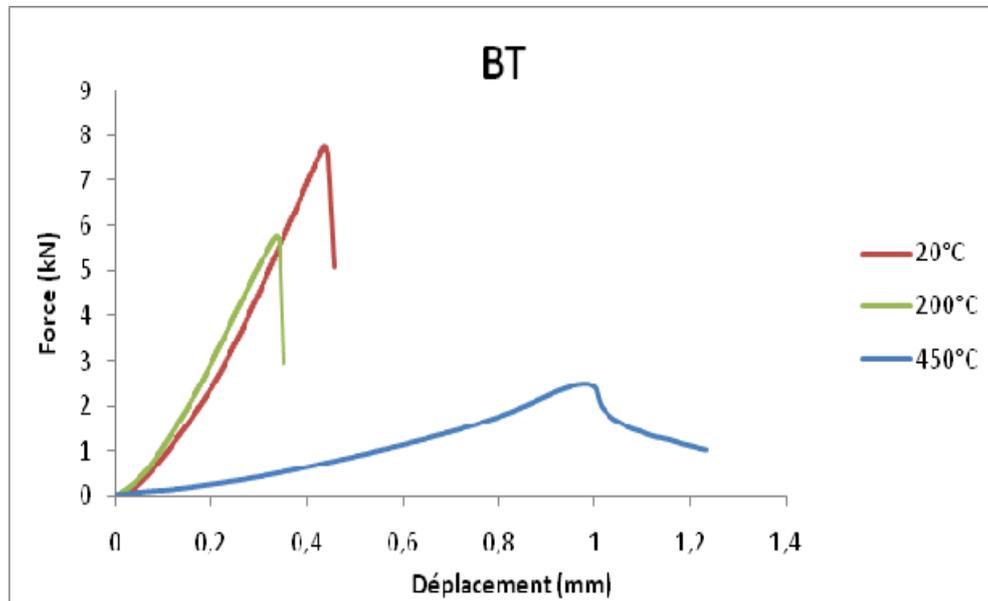


Figure 2.4 : Courbes Force-déplacement du béton témoin (BT) à différentes températures [81].

La courbe force-déplacement du béton sans fibres (béton témoin) à la température de 20°C est caractérisée par deux phases distinctes : une première phase ascendante pratiquement linéaire, qui évolue jusqu'à atteindre une course d'environ 0,44 mm, équivalent à une force ultime de 7,64 kN. Une seconde phase se caractérisant par une chute brutale de la résistance qui correspond à l'apparition des premières fissures (rupture fragile). Une même allure de courbe est observée dans le cas du béton soumis à 200°C, avec par contre une résistance ultime mesurée de 5,70 kN pour 0,33 mm de course. Pour le béton traité à 450°C, la première phase se caractérise par un profil pas tout à fait linéaire atteignant une valeur de résistance ultime de 2,49 kN correspondant à 1 mm de déplacement. Une deuxième phase adoucissante cette-fois est notée après le point de résistance ultime.

➤ **Résistance à la traction du béton de fibres métalliques (BFM) à différentes températures :**

Les résultats des essais sur éprouvettes en béton de fibres métalliques (BFM) sont représentés par les courbes force-déplacement de la figure 2.5.

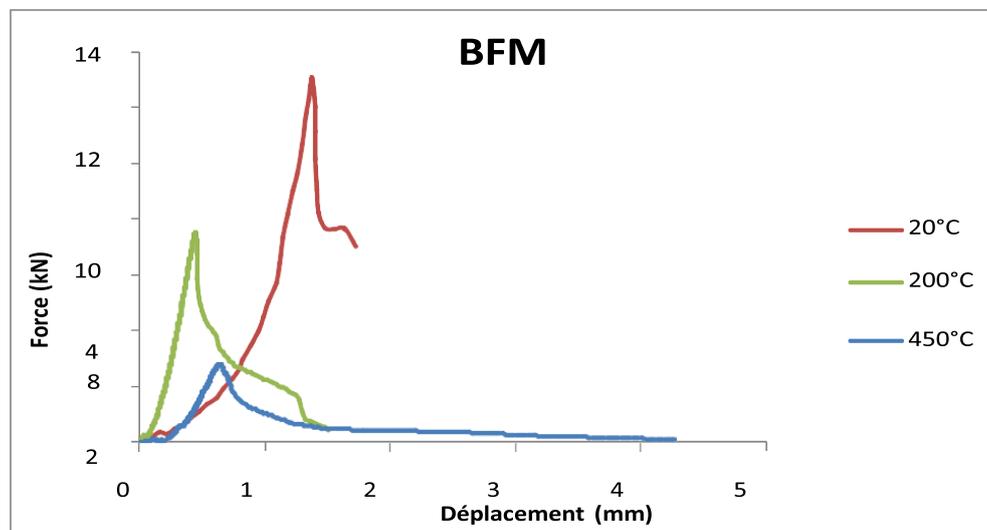


Figure 2.5: Courbes Force-déplacement du béton de fibres métalliques (BFM) à différentes températures [81].

L'allure de la courbe force-déplacements du béton de fibres (1% de fibres métalliques) à 20°C ne diffère pas significativement de celle du béton de fibres de polypropylènes (Figure 2.7), la différence se situe au niveau de la valeur au pic d'effort, qui est de l'ordre de 13.8 kN correspondant à un déplacement de 1.12 mm. Pour les bétons soumis aux températures de 200°C et 450°C, nous remarquons la perte plus ou moins importante des résistances mécaniques du matériau selon la température appliquée. Le déplacement le plus important est donné par le béton traité à 450°C, il est de l'ordre de 1.5 mm. Au delà de cette dernière une déformabilité importante est observée pour ce modèle, il atteint un déplacement de 4.2 mm.

Le tableau 2.2 résume les résultats des essais en traction par flexion sur les différents bétons BT et BFM et ceci pour les trois températures envisagées.

Tableau 2.2 : Résistances en traction par flexion des différents bétons (BT et BFM).

Type de béton	Température (°C)	Déplacement (mm)	Force (kN)
Béton témoin	20	0.43	7.64
	200	0.33	5.66
	450	0.42	2.36
Béton de fibres métalliques	20	1.12	14.8
	200	0.25	7.40
	450	0.44	2.73

2.3. Durabilité des bétons renforcés par des fibres polypropylène :

2.3.1. Généralités sur les fibres polypropylène :

Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de faisceaux, elles se séparent lors du malaxage. Elles se répartissent de façon multidirectionnelle dans le béton.

Les fibres polypropylène permettent en particulier de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais mais n'améliorent pas son comportement post-fissuration (contrairement aux fibres métalliques). Elles améliorent la maniabilité et la cohésion du béton (en particulier dans le cas de béton projeté). Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement mais peu résistantes au feu (température de fusion comprise entre 140 à 170 °C).

2.3.2. Influence des fibres polypropylène sur le comportement du béton :

• Résistance en compression :

➤ Résistance à la compression du béton de fibres polypropylène (BFPP) à différentes températures :

La figure 2.6 présente les courbes contraintes-déformations des bétons de fibres de polypropylène à différentes températures.

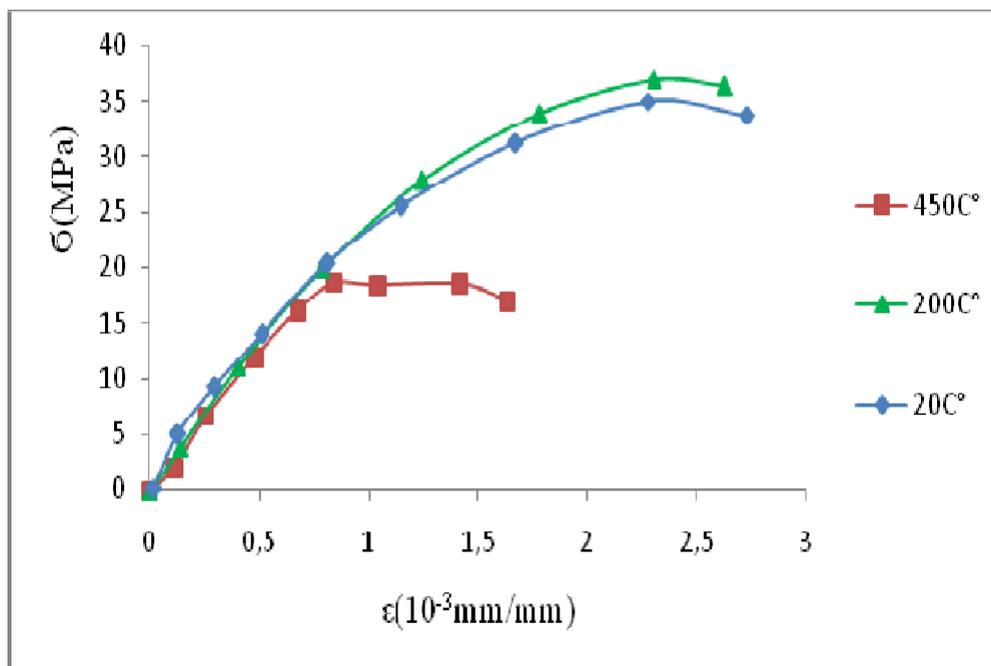


Figure 2.6 : Courbes contraintes-déformations des bétons de fibres de polypropylène (BFPP) à différentes températures [81].

Les courbes de cette figure ont la même allure, une augmentation de la résistance à 200°C d'environ $4\% \times f_{c28}$, dû certainement à l'effet de couture des fissures des fibres par rapport à celle correspondant à 450°C, il y'a une réduction de la résistance maximale d'environ 41.71% par rapport au béton témoin. On remarque un certain palier stable caractérisant la partie ductile de la courbe, à partir de 0.78 mm/mm.

• **Résistance en traction par flexion :**

➤ **Résistance à la traction du béton de fibres de polypropylène (BFPP) à différentes températures :**

Les résultats des essais sur éprouvettes en béton de fibres de polypropylène (BFPP) sont représentés par les courbes force-déplacement de la figure 2.7.

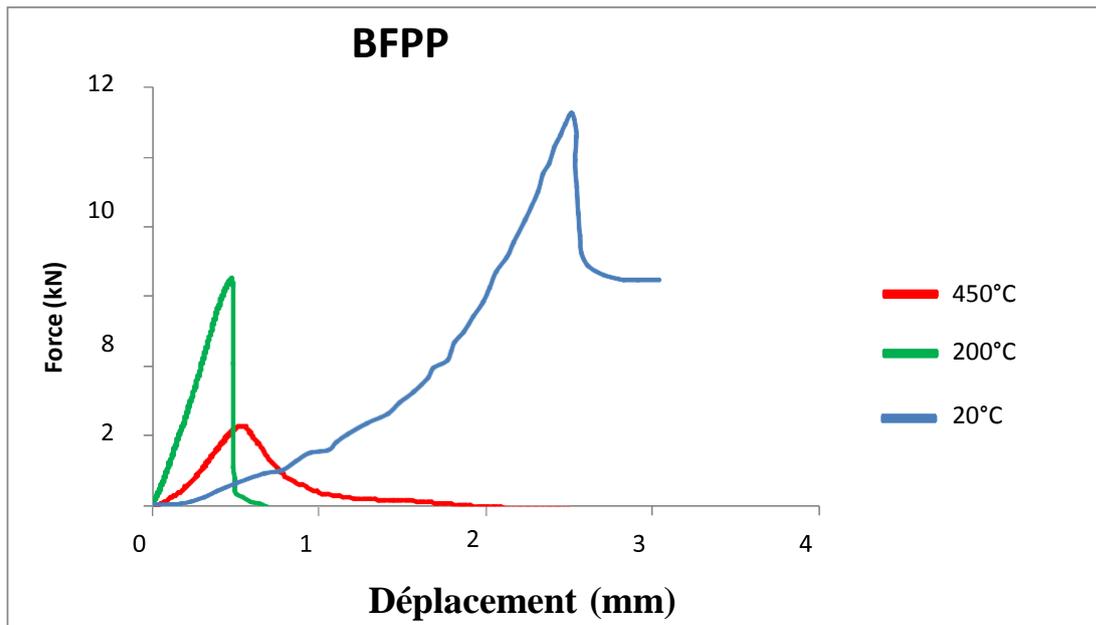


Figure 2.7 : Courbes Force-déplacement du béton de fibre de polypropylène (BFPP) à différentes températures [81].

On peut diviser le comportement des bétons (BFPP) à 20°C en trois parties :

- Une partie courbée pratiquement linéaire avant fissuration du béton de fibres (BFPP), qui est comparable au béton témoin BT (sans fibres), avec un déplacement de l'ordre de 2.5 mm à 20°C, de 0.42 mm à 200°C et de 0.66 mm à 450°C, qui aboutit au pic d'effort d'intensité de (12.6kN pour 20°C, 6.31kN pour 200°C et 2.43kN pour 450°C), correspondant à l'apparition de la fissuration endommageable du matériau.
- Une partie descendante linéaire, dans laquelle l'effort de traction diminue rapidement à partir des valeurs maximales présentées précédemment (rupture fragile du matériau béton).
- Une partie stable, dans laquelle l'effort de traction est pratiquement stable, cela correspond à l'élargissement des fissures. A ce moment, les fibres se mettent en tension, car les efforts du béton leur sont transmis par leur adhérence. Pour les bétons soumis aux températures de 200°C et 450°C, nous remarquons la perte plus ou moins importante des résistances mécaniques du matériau selon la température appliquée, la chute subie étant la plus importante dans le cas d'une température de 450°C, cela est dû à l'endommagement d'une part thermique du matériau, et d'autre part, à la dégradation des fibres PP, au fil du chauffage.

Le tableau 2.3 résume les résultats des essais en traction par flexion sur les différents bétons BT et BFPP et ceci pour les trois températures envisagées.

Tableau 2.3 : Résistances en traction par flexion des différents bétons (BT et BFPP).

Type de béton	Température (°C)	Déplacement (mm)	Force (kN)
Béton témoin	20	0.43	7.64
	200	0.33	5.66
	450	0.42	2.36
Béton de fibres polypropylènes	20	2.5	12.6
	200	0.44	6.31
	450	0.61	2.43

2.4. Durabilité des bétons renforcés par des fibres de verre :

2.4.1. Généralités sur les fibres de verre :

Les fibres de verre en raison de leurs qualités mécaniques et de leur coût modéré, ont été les premières fibres artificielles à être utilisées dans les matériaux de construction. Cependant, leur utilisation est limitée en raison de leur faible résistance chimique aux alcalis. En outre, les chercheurs ont montré que l'introduction de fibres en petites quantités ne modifie pas significativement les performances mécaniques mais peut, en revanche, contrôler la fissuration due au retrait du séchage à un jeune âge. Les mêmes effets ont également été observés lorsque des fibres synthétiques sont utilisées [82].

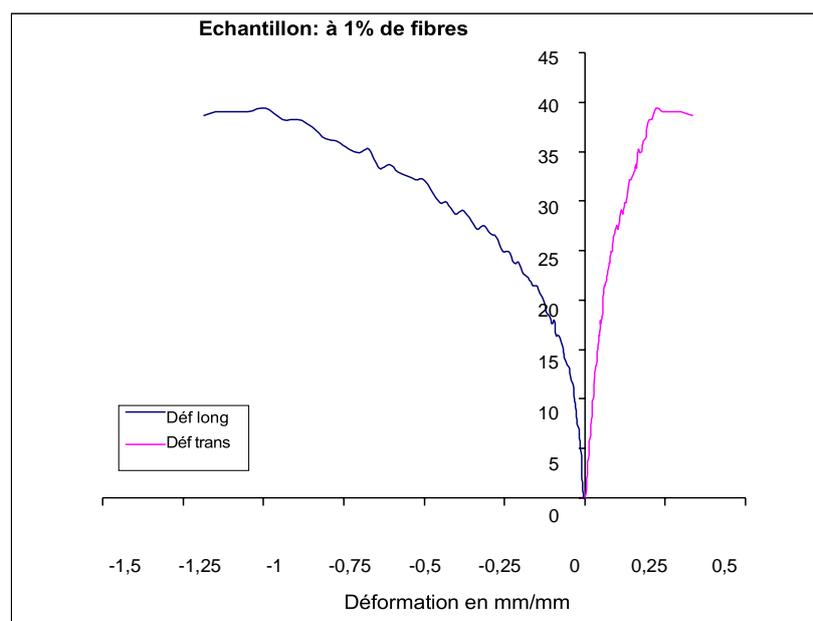
2.4.2. Influence des fibres de verre sur le comportement du béton :

• Résistance en compression :

La figure 2.8 illustre un exemple de courbes contrainte-déformation enregistré en compression simple pour le matériau de référence et des matériaux fibrés à 1 et 2% pour la longueur de fibres de 12 mm. Sur ces courbes sont représentées la variation de la contrainte en fonction des déformations longitudinales et radiales. Ces courbes sont classiques pour les matériaux granulaires en compression. Les échantillons fibrés présentent une déformation à la rupture nettement supérieure

à celle obtenue pour l'échantillon de référence et le constat est identique lorsque la teneur en fibres passe de 1 à 2%. La similitude est la même aussi en faisant une comparaison entre les deux types de déformations longitudinale et radiale. La déformation transversale à la rupture a augmenté pour les échantillons fibrés, ce qui laisse penser que les fibres, ont pris une orientation transversale lors de la mise en œuvre.

Ces courbes se caractérisent d'abord par un comportement linéaire traduisant le caractère élastique jusqu'un niveau de contrainte de 15 Mpa et cette limite de linéarité est constatée pour les 3 types d'échantillons. Au-delà de cette valeur de contrainte, les courbes s'incurvent en s'écartant de la linéarité traduisant le développement d'un endommagement progressif. La limite de linéarité, représente en moyenne 70% de la contrainte ultime pour l'échantillon de référence, tandis que pour les matériaux fibrés elle ne représente que 40%, alors que la contrainte à la rupture de ces derniers est presque le double de celle du matériau de référence. Pour le cas du matériau non fibré au-delà de ce niveau de contrainte la propagation de la fissuration semble évoluer rapidement, c'est le cas typique des matériaux de type élastique fragile. Il apparaît que les fibres retardent l'endommagement brusque des matériaux et n'apportent pour ce type de sollicitation aucune ductilité. A partir de ces résultats, il apparaît que les fibres de verre n'interviennent pas dans le domaine élastique et les propriétés mécaniques élastiques en compression des bétons semblent avant tout régies par celles de la matrice.



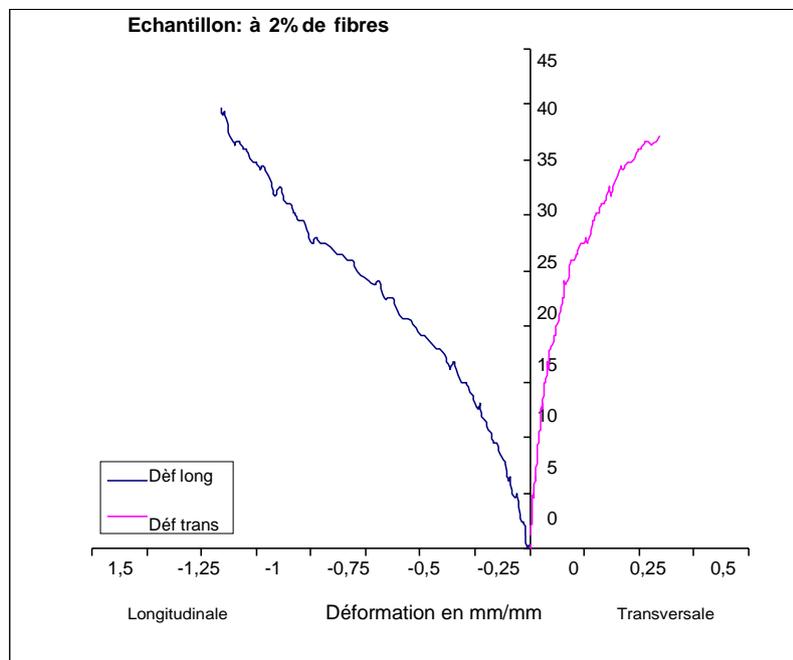
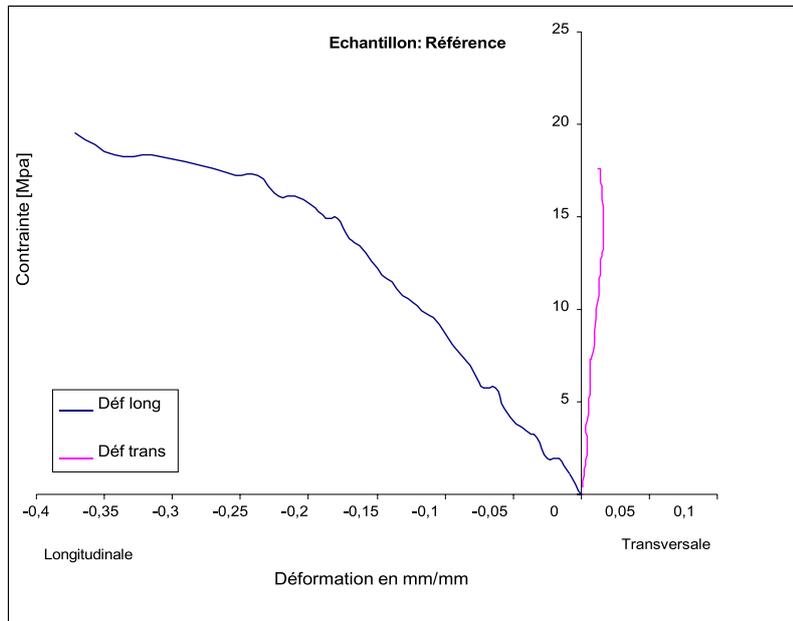


Figure 2.8 : Déformations longitudinale et transversale obtenues avec un essai de compression [82].

La figure 2.9 montre des lignes de fissures dans le sens de l'application de l'effort de compression donnant un mode de rupture sous forme de lamelles. Il est à noter que l'essai de compression a été réalisé sans plateau de compensation.



Figure 2.9 : Mode de rupture en compression de l'échantillon cylindrique [82].

Le tableau 2.4 regroupe les principales caractéristiques mécaniques des échantillons. Celles-ci sont obtenues à partir des courbes contrainte-déformation.

Tableau 2.4 : Propriétés mécaniques obtenues des matériaux de référence et fibrés [82].

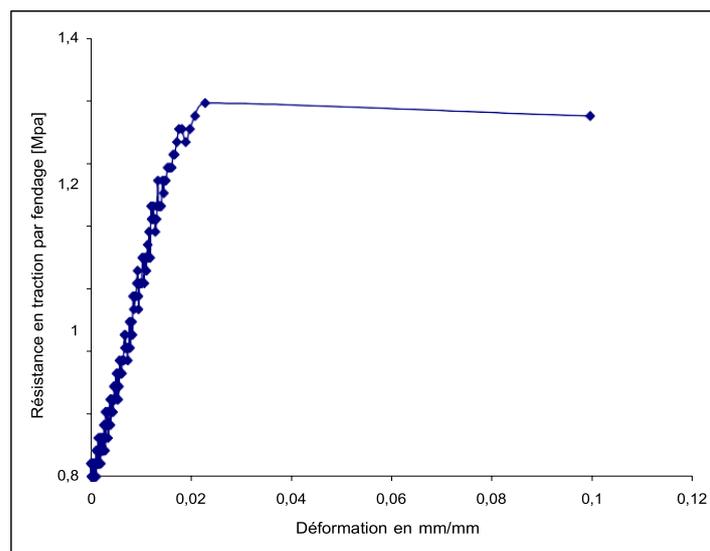
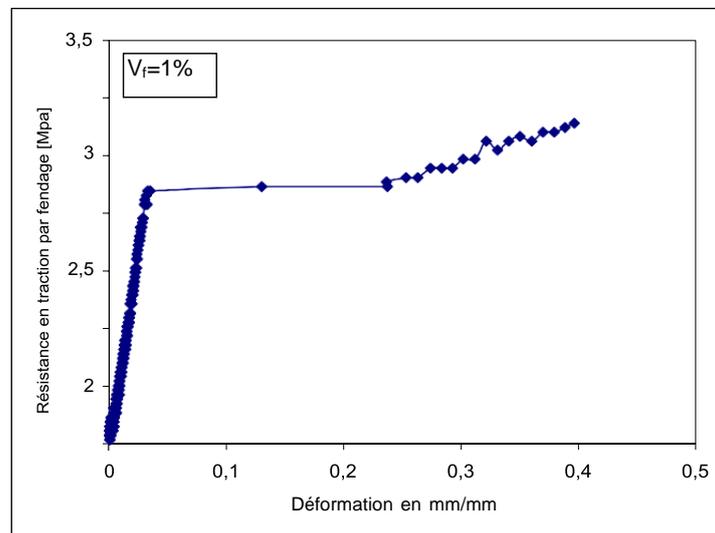
Echantillons	Béton témoin	1% de fibres	2% de fibres
Module de Young ; E [Gpa]	21,0	21,7	21,1
Coefficient de Poisson ; ν	0,18	0,22	0,24
Limite élastique [Mpa]	16,0	16,5	15,1
Contrainte de rupture [Mpa]	21	39,4	39,8

• Résistance en traction :

La résistance en traction demeure la spécificité des composites fibrés. Cependant, la réalisation d'un essai de traction direct est délicate et l'appréciation de cette caractéristique est souvent réalisée à partir de l'essai de fendage.

Les courbes présentées sur la figure 2.10 relatives aux échantillons de référence non fibré et aux échantillons fibrés à 1 et 2% de fibres de longueur 12 mm, sont similaires à celles obtenues en traction direct, et rapportées dans la bibliographie [26]. La contrainte ultime voisine de 6 Mpa pour l'échantillon à 2% de fibres, est proche des résultats disponibles dans la littérature [27] pour des matériaux fabriqués et conservés dans les mêmes conditions.

Avec l'échantillon à 1% de fibres, la limite élastique a doublé quasiment par rapport à celle de la matrice non fibrée et elle est presque de 4 fois pour l'échantillon à 2% de fibres, soulignant ainsi l'apport des fibres et le dosage dans cette zone. A la limite de la linéarité des courbes, les matériaux fibrés semblent présenter un léger saut d'effort et ceci marque le début d'endommagement sous forme de petites fissures ou microfissures non visibles à l'œil. Par ailleurs, au-delà de cette zone apparaît un palier légèrement croissant et ceci est obtenu uniquement avec les spécimens fibrés. Ce palier est caractéristique d'une pseudo-ductilité du composite qui semble intéressante pour ces matrices (on atteint un rapport déformation irréversible/déformation élastique égal à ≈ 5), avec une déformation ultime qui atteint l'ordre de 0,45 mm/mm quand celle de l'échantillon non fibré est limitée à 0,02.



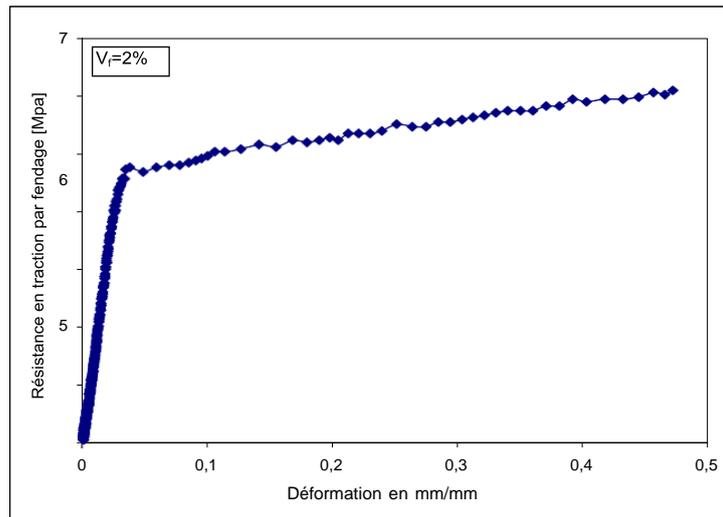


Figure 2.10 : Courbes contrainte-déformation de traction par fendage [82].

La figure 2.11 montre une photo illustrant le mode de rupture obtenu en traction par fendage. A travers la fissure on remarque la disposition des fibres dans le sens de l'écartement des deux lèvres de celle-ci ce qui dénote d'une amélioration obtenue de la résistance en traction par fendage des échantillons fibrés.



Figure 2.11 : Mode de rupture en traction par fendage [82].

Dans le tableau 2.5 sont rassemblés les principales valeurs remarquables relevées lors de l'essai de traction par fendage effectué sur les bétons élaborés :

Tableau 2.5 : Principales valeurs remarquables relevées dans l'essai de traction par fendage [82].

Echantillons	Béton témoin	1% de fibres	2% de fibres
Limite élastique [Mpa]	1,2	2,2	4,4
Contrainte de rupture [Mpa]	1,3	2,8	6,1
Déformation à la rupture [mm/mm]	0,02	0,39	0,47
Gain de contrainte dû à l'écroutissement en (%)	0	21	27,5

2.5. Pathologie des bétons fibrés :

2.5.1. Alkali – Réaction :

L'alkali-réaction, Appelé aussi les réactions alkali-granulats "**RAG**" désigne la 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 des ouvrages atteints qui entraînent de la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton. Afin qu'une réaction alkali-granulats ait lieu, les trois conditions suivantes doivent être réunies mais ne donnent pas forcément lieu à la réaction :

- ✓ Présence de granulats réactifs.
- ✓ Teneur suffisante en alcalins dans le béton.
- ✓ Milieu ambiant humide (80 à 85%).

Pathologie et manifestations externes :

La pathologie et les manifestations externes se signalent par un ou plusieurs des symptômes suivants :

- ✓ un faïençage à mailles plus ou moins larges ou en étoile ou une fissuration orientée suivant une direction fonction de la distribution des armatures.
- ✓ forme des sécrétions blanches de calcite et parfois des gels transparents.
- ✓ apparence des pustules ou cratères avec des éclatements localisés en forme de petits cônes résultant de la réaction de gros granulats superficiels qui sont visibles au fond des cratères d'éclatement.
- ✓ mouvements, déformations et fissures dans le béton.
- ✓ l'apparition de colorations ou de décoloration dans le béton.

Les différents types d'alkali-réaction :

On distingue principalement trois types de réactions :

- ✓ La réaction alcali-silice.
- ✓ la réaction alcali-silicate.
- ✓ la réaction alcali-carbonate.

Ce type de pathologie varie selon : la teneur en granulats et leur nature ; l'augmentation de la teneur en alcalis du ciment qui accélère la réaction ; l'élévation de la porosité ; la température et le degré d'humidité élevée sont des paramètres qui développent le phénomène. La figure 2.12 montre les conséquences de réaction alcali –granulats comme les décolorations du béton dues à l'exsudation du gel, et les fissurations orientées et en réseaux, ainsi que les dilatations du béton, les auréoles, les pustules et d'autres symptômes d'ordre physicochimique et mécanique [28].



Figure 2.12 : Phénomène d'alcali réaction rencontré [28].

- **La réaction alcali-silice :**

La réaction alcalis-silice (RAS) est la réaction la plus courante, elle constitue un problème majeur au plan de la durabilité des bétons. Comme toute réaction chimique, la réaction alcali-silice évolue dans le temps, impliquant la consommation de réactants. Il s'agit d'une réaction hétérogène entre certaines phases siliceuses réactives des granulats et les ions hydroxydes alcalins dissous dans la solution interstitielle du béton. La réaction se poursuit tant que les deux réactants sont en quantité suffisante. L'épuisement de la silice réactive ou des ions hydroxydes conduira inexorablement à la fin de la réaction. La silice est généralement stable en milieu neutre ou acide mais le béton (dont le pH est généralement supérieur à 13) constitue un environnement particulièrement agressif vis-à-vis de certaines phases siliceuses (Figure 2.13). Après dissolution de la silice, un gel hydrophile est formé, dont les caractéristiques dépendront d'un bon nombre de facteurs. La pression exercée par le gel fracture les

particules de granulat et provoque la propagation des fissures dans le béton environnant. La quantité du gel formé dépend de la quantité et du type de la silice réactive et de la concentration en hydroxydes alcalins. Généralement, la réaction alcalis-silice entraîne une fissuration en faïençage [29].



Figure 2.13 : Ouvrage atteint de réaction alcali-silice [31].

➤ **Mécanisme de réaction :**

Comprendre le mécanisme d'ASR n'est pas si simple parce qu'il se compose de plusieurs étapes. Toutefois, Pan et ses collègues signalent que Glasser et Kataoka ont proposé une description simplifiée en deux étapes. Premièrement, la réaction se produit entre les ions hydroxydes (OH^-) présents dans la solution des pores du béton et la silice réactive de l'agrégat. Il est important de souligner que, dans un premier temps, l'alcalis (Na^+ et K^+) contribue à l'augmentation de la concentration des ions hydroxydes en solution et, ensuite, à la formation de gel expansif. La présence d'alcalis influence la réactivité des agrégats et l'étendue de la réaction : lorsqu'il y a plus d'alcalins disponibles, la concentration d' OH^- dans la solution interstitielle est plus élevée et plus de silice est dissoute [30].

• **Réaction alcali- silicate :**

Les réactions alcali-silicate sont assez semblables aux réactions alcali-silice ; elles diffèrent principalement par leurs vitesses : les réactions alcali-silice sont plus rapides.

- **Réaction alcali-carbonate :**

La durabilité du béton contre la réaction alcali-carbonate (ACR) pose les plus grands problèmes de durabilité à long terme du béton. L'ACR est principalement l'interaction des alcalis de ciment avec le calcaire dolomitique argileux. Cela devrait être différencié des actions du calcaire siliceux, qui sont perceptibles dans le gel alcalin-siliceux et la fissuration due à l'attaque de solutions de base sur le composant siliceux de l'agrégat. La distinction entre les réactions alcali-carbonate et alcali-silice n'est pas claire dans de nombreuses études. La réaction alcali-carbonate n'est pas aussi fréquente que la réaction alcali-silice (ASR); cependant, l'ACR peut être suspecté partout où des roches dolomitiques argillacées sont entrelacées avec d'autres types de dolomite ou de calcaire. Certains chercheurs ont exploré les isothermes de sorption et d'expansion du calcaire dolomitique, et ils ont trouvé un signe d'un matériau semblable à un gel, et ont conclu que le mécanisme était similaire à l'ASR [80]. Tetsuya Katayama (2010) a observé que l'ASR peut jouer un rôle dans l'ACR et qu'elle est impliquée dans l'expansion et la détérioration du béton [78]. Selon lui, l'ACR était un cas particulier d'ASR. Cette conclusion a été confirmée par Grattan-Bellew (2010) [79].

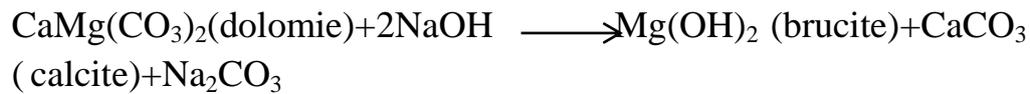


Figure 2.14 : Un exemple d'ouvrage affecté par la réaction alcali-carbonate [79].

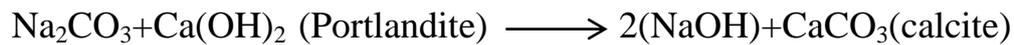
➤ **Le mécanisme de la réaction alcali-carbonate :**

Malgré 50 ans de recherches, le mécanisme de cette réaction n'est toujours pas bien compris. Il s'agit d'une dolomitisation. La dolomitisation ou la décomposition de la dolomie (dissolution superficielle du granulats), forme de la brucite (hydroxyde de magnésium, $Mg(OH)_2$) et de la calcite.

La dédolomitisation correspond à la réaction suivante :



-La solution alcaline est régénérée en permanence :



Lors de la transformation de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) en brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), la porosité augmente, de l'humidité peut ainsi arriver jusqu'aux inclusions d'argile, lesquelles gonflent au sein de la matrice de la roche, alors une expansion considérable peut se produire. La dédolomitisation peut produire de l'expansion de manière directe ou indirecte, et, dans ces deux cas, elle est généralement un prérequis à d'autres processus d'expansion [29].

2.5.2. Lixiviation :

Introduction :

Le béton est constitué de matériaux inorganiques qui ont tendance, à des degrés divers, à réagir avec l'eau ou, comme le dit Moskvin (1980), « À mesure que les minéraux composant le ciment durci entrent en contact avec l'eau, les concentrations d'hydroxyde de calcium courantes pour la plupart des composés solubles s'équilibrent graduellement (Figure 2.15). Le ciment durci n'est pas un corps homogène par sa structure ou ses propriétés, dont l'une est la solubilité. En plus des produits d'hydratation, il contient des grains non hydratés de clinker. Ce système complexe est en équilibre instable, c'est-à-dire qu'il change constamment.

En dissolvant un élément du système, l'eau perturbe l'équilibre à un certain point du système, le faisant transformer en un nouvel équilibre pour satisfaire les nouvelles conditions. Le taux de détérioration est, en règle générale, contrôlé par le taux de diffusion interne. L'interaction d'une solution aqueuse agressive avec les minéraux du ciment trempé hydraté entraîne soit la libération des produits de réaction en phase solide, ou dans la dégradation du ciment durci en un conglomérat de composés insolubles. La cinétique d'une telle dégradation dépend également de la forme dans laquelle les nouvelles formations se séparent : qu'il s'agisse de sédiments meubles ou de films denses qui créent une

obstruction croissante à la diffusion dans les vides de la couche superficielle en phase solide. Dans l'étude d'un système aussi complexe qu'une matrice de ciment, il est incroyablement difficile de faire la distinction entre les processus séparés mais interconnectés de diffusion capillaire, de surface et de convection, ou entre les interactions des ions de diffusion avec divers minéraux du ciment durci qui sont compliquées par des obstacles stériques (Moskvin, 1980).

Un processus de lixiviation dans le béton pourrait être considéré comme reflétant une ambition générale de la nature d'atteindre des niveaux d'énergie inférieurs. Les liaisons chimiques sont brisées et les solides sont dissous, bien que la rupture des liaisons chimiques nécessite une certaine énergie d'entrée. L'énergie libérée lorsque les molécules ou les ions en question sont dissous par l'eau fait que le niveau d'énergie total devient plus bas et plus stable. La solution interstitielle dans le béton est en équilibre thermodynamique avec le matériau solide. Si certains paramètres de la relation thermodynamique, comme la température ou la pression, sont modifiés, ou si l'un des matériaux dissous dans la solution interstitielle est emporté, l'équilibre est perturbé [32].

Dans le béton à haute porosité et perméabilité, de grandes quantités d'eau peuvent être transportées, ce qui augmente le risque de problèmes de lixiviation. On a également observé que les maximums locaux de lixiviation apparaissent autour des fissures qui créent des zones plus faibles, car l'eau y est bien accessible (Rombén, 1997). Si le béton à faible porosité et perméabilité est exposé au lessivage, l'attaque ne sera probablement pas aussi grave car moins d'eau est transportée à travers le matériau. Le mécanisme de lixiviation est normalement un processus lent qui nécessite de longues périodes de temps avant que des problèmes ne surviennent.

Le lessivage du béton correspond au lessivage des hydrates de la pâte de ciment durcie au contact des milieux liquides. Du fait des gradients de concentration, les ions présents dans la solution interstitielle de la pâte de ciment diffusent vers la solution agressive, créant ainsi un déséquilibre entre la phase liquide et la phase solide du matériau. Des réactions chimiques de dissolution / précipitation dues aux changements de concentration se produisent.



Figure 2.15 : Aspect d'une surface en béton ayant été soumise au phénomène de lixiviation [39].

➤ **Mécanisme de lixiviation :**

En raison de l'action du milieu fluide, la dégradation du béton peut impliquer :

- ✓ des phénomènes mécaniques liés à l'action érosive de leur circulation sur le béton.
- ✓ des phénomènes physiques permettant le transport des espèces ioniques sous l'effet de gradients de concentration (diffusion) ou de pression (perméation).
- ✓ des phénomènes chimiques liés à des variations de concentration engendrant des sursaturations ou des sous saturations conduisant à des dissolutions ou à des précipitations.

La lixiviation des matériaux à base de ciment se rapporte principalement aux composés de chaux formés pendant l'hydratation. Le mécanisme de lixiviation comprend le transport des ions de la phase solide vers le milieu environnant. La solution interstitielle d'un matériau cimentaire est, comme mentionné précédemment, une solution très basique à pH élevé. Cela signifie que lorsque l'eau entoure un matériau cimentaire, un gradient de concentration sera présent en raison d'une concentration d'ions plus faible dans l'eau externe que dans la solution interstitielle. Ce gradient de concentration agira comme force motrice car les composés sont transportés par diffusion à travers le matériau. À mesure que la diffusion se produit, les composés doivent être dissous pour maintenir l'équilibre entre la solution interstitielle et le matériau solide. L'eau à faible pH et concentration d'ions sera donc agressive pour les matériaux cimentaires. La lixiviation est principalement décrite comme un processus couplé de diffusion/dissolution

L'ordre dans lequel les composés seront dissous dépend principalement de sa solubilité dans l'eau. NaOH (hydroxyde de sodium) et KOH (hydroxyde de potassium) ont une solubilité élevée et sont les premiers composés à être lessivés. Dans les solutions avec une concentration croissante de NaOH ou KOH, la solubilité des composés de calcium sera continuellement réduite (Ekström, 2003). La plupart de la chaux lixiviée provient du CH (hydroxyde de calcium) en raison de sa solubilité élevée et de sa grande quantité, mais la chaux sera également lessivée des phases AF et du C-S-H, bien qu'en quantités beaucoup plus petites et principalement après que le CH ait été lessivé.

La concentration de calcium dans la solution interstitielle et dans le matériau solide peut être associée à une courbe d'équilibre solide-liquide décrivant la dissolution de CH et de C-S-H, (Figure 2.16). Selon Duchesne et Bertron (2013) la dissolution de CH a lieu lorsque la concentration du Calcium dans la solution interstitielle descend en dessous de 22 mmole/l (=880mg/l). Le C-S-H est décalcifié de façon intermittente entre 2 et 22 mmole/l, ce qui entraîne une diminution du rapport Ca/Si à environ 1. À des concentrations inférieures à 2 mmole/l 80 mg/l), la décalcification totale du C-S-H se produit et la phase solide se transforme en gel de silice. Pour des raisons d'équilibre, CH serait donc le premier composé de la chaux exposée à l'attaque, mais selon Taylor (1997) en raison de la plus grande surface spécifique des phases C-S-H et aluminates, l'attaque est en pratique susceptible de se produire en même temps. Dans Duchesne & Bertron (2013), il est toutefois indiqué que le CH est le premier composé à se dissoudre à un pH de 12,5, suivi de l'ettringite à 10,7, tandis que le C-S-H commence à se dissoudre dans la gamme de 10,5-8,8 [33].

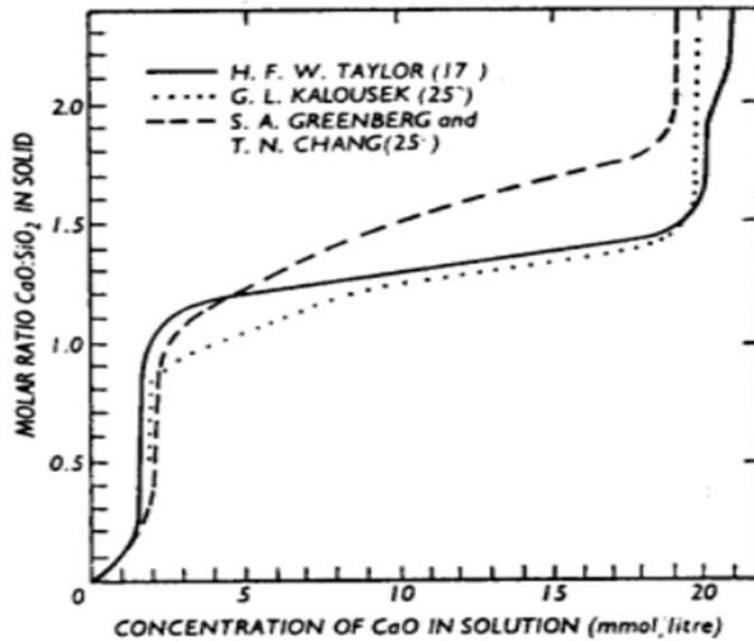


Figure 2.16 : Diagramme d'équilibre entre le rapport Ca/Si des différents hydrates et la concentration en calcium de la solution interstitielle [33].

2.5.3. Carbonatation :

Le CO_2 de l'air a tendance à réagir avec les produits hydrates du béton et préférentiellement avec les bases alcalines dont notamment le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ selon la réaction:

$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$. Cette réaction est appelée carbonatation.

La carbonatation commence à la surface du béton et se propage lentement en profondeur. Son influence sur le béton lui-même est favorable car elle le rend plus compact et augmente sa résistance mécanique et sa durabilité. Il agit comme une protection naturelle contre la pénétration de gaz et de liquides. Le béton non armé profite pleinement de l'influence favorable de la carbonatation.

Le pH élevé du béton jeune conduit à la formation d'une couche d'hydroxyde de fer (couche de passivation) autour des barres d'armature. Cependant, la réaction de carbonisation peut conduire à une diminution du pH. Par conséquent, la couche de passivation située autour des armatures devient instable et perd sa capacité protectrice dès que le front de carbonatation atteint l'armature. Une

corrosion à grande échelle et relativement généralisée est ainsi enclenchée (Figure 2.17) [34].



Figure 2.17 : Éclatement du béton d'enrobage à cause de la carbonatation [28].

Plusieurs facteurs influencent la vitesse de propagation de la carbonatation, certains sont internes (composition du béton) et d'autres externes (liés à l'environnement). On peut citer alors, le rapport E/C, le pourcentage du CO₂, la température et l'humidité. Les premiers essais selon [EN 206-1], réalisés sur du béton ordinaire et du béton auto-compactant, ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre leur cinétique de carbonatation [35].

2.5.4. Attaque sulfurique :

La dégradation du béton causée par des agents agressifs externes est l'une des principales raisons de la réduction de la durée de vie des structures en béton. Parmi les divers agents agressifs externes, le sulfate est l'un des facteurs les plus préoccupants qui causent une détérioration rapide et sévère du béton (Figure 2.18). Lorsque les ions sulfate pénètrent dans le béton par diffusion ou aspiration capillaire et réagissent avec les ions de la solution interstitielle, c.-à-d. Ca²⁺ et Al³⁺, des produits de réaction, tels que l'ettringite secondaire et le gypse, sont formés. À mesure que de plus en plus d'ions sulfates pénètrent dans la matrice du béton, une forte déformation du béton, comme la fissuration, et l'écaillage, se produisent et par conséquent, augmentent la perméabilité et réduisant finalement la résistance du béton [36].



Figure 2.18 : Dégradations causées par les attaques sulfatiques [28].

Selon la source des ions, l'attaque sulfate est divisée en deux types :

- attaque interne où des sulfates sont déjà présents dans le mélange avant que le ciment ne soit hydraté.
- attaque externe où le béton est exposé à un environnement chargé de sulfate.

➤ **Mécanismes d'attaques :**

Une attaque au sulfate s'est produite à divers endroits dans le monde. Certains environnements sulfatés courants sont les sols, les eaux souterraines, les fluides de transport, les sols ou fluides contenus et l'eau de mer. De nombreuses structures en béton sont exposées à ces environnements et l'accumulation de sulfates sur une face exposée augmente le potentiel de détérioration.

Le mécanisme de détresse pour l'attaque du sulfate est une pression expansive causée par la transformation du monosulfoaluminate en ettringite. Ce mécanisme peut être décrit comme une séquence de processus. Tout d'abord, le sulfate externe réagit avec l'hydroxyde de calcium pour saturer la solution interstitielle et précipiter le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). L'augmentation de la concentration de SO_4 favorise la transformation du monosulfoaluminate en ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Cette transformation provoque une augmentation du volume solide, qui se traduit par la détérioration du béton en provoquant des fissures, un ramollissement et un éclatement. Le mécanisme d'expansion est causé par la pression à partir de la croissance des cristaux d'ettringite ou par le gonflement dû à l'absorption d'eau. Une autre propriété du béton mesurable identifiée avec le mécanisme d'attaque du sulfate ce qui mène à une diminution de la résistance à la compression.

Différents sulfates peuvent affecter le béton différemment. Le sulfate de magnésium est le plus sévère en raison de la présence d'ions magnésium. Ces ions peuvent provoquer des réactions corrosives supplémentaires par la formation de $Mg(OH)_2$ et d'ettringite. Cela décompose également le C-S-H.

Formation d'ettringite différée :

Les exemples d'attaque de sulfate comprennent la formation d'ettringite, la formation retardée d'ettringite et la formation de thaumasite.

-L'ettringite ou l'hydroxyde de sulfate de calcium et d'aluminium hydraté ($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$) est formé par la réaction entre les ions sulfate et les phases d'aluminate dans le ciment. Il se forme naturellement pendant l'hydratation du ciment car le sulfate de calcium est inclus dans les matériaux du mélange pour contrôler l'hydratation. C'est un produit expansif mais la détérioration ne se produit que lorsqu'il se forme après que le ciment a durci.

La formation naturelle d'ettringite pendant l'hydratation peut être retardée si la température du béton s'élève à des valeurs supérieures à $65^\circ C$ pendant la prise de la pâte de ciment. L'expansion interne ultérieure qui résulte de la formation retardée d'ettringite entraîne une fissuration du béton. La chaleur, qui pose le problème, peut provenir des réactions d'hydratation exothermique ou du régime de durcissement appliqué (par exemple, durcissement à la vapeur). Ces problèmes doivent être résolus par une conception appropriée [37].

Une forme plus courante d'attaque de sulfate du béton se produit lorsque des sulfates provenant d'une source externe pénètrent dans le béton et produisent de l'ettringite. Les sulfates peuvent être présents dans les eaux souterraines, les canaux et les égouts. La détérioration commence à partir de la surface. Les bords et les coins sont particulièrement vulnérables et il en résulte une surface de béton friable

- La thaumasite est un hydrate de sulfate de carbonate de silicate de calcium ($Ca_3Si(OH)6CO_3SO_4 \cdot 12H_2O$) formé par l'attaque au sulfate du béton ou du mortier. On le trouve généralement dans des conditions froides et humides rencontrées dans le béton enfoui et une source de sulfate, de carbonate et d'eau est nécessaire. La thaumasite se trouve souvent dans le béton contenant du calcaire comme agrégat qui peut fournir la source des ions carbonate. Il se développe de manière expansive, la pâte de ciment et l'agrégat les deux sont

attaqués. Il s'agit d'une forme inhabituelle de détérioration affectant un nombre limité de structures.

Diverses lignes directrices ont été élaborées pour faciliter la détection des environnements associés à un risque élevé de détérioration et les mesures à prendre pour éviter une telle détérioration (BCA, 2001). Ces étapes comprennent l'utilisation de revêtements et de types de ciment résistant. Les dommages existants peuvent être réparés en remplaçant le béton endommagé. Ceci peut être complété par un revêtement de barrière pour éviter une contamination supplémentaire par les sulfates [37].

2.5.5. Attaque chimique :

- **Attaque par les acides**

Le béton est peu résistant aux acides ou aux composés qui peuvent se transformer en acide (Figure 2.19). Plusieurs acides organiques et inorganiques peuvent être présents dans l'eau de mer ou les eaux souterraines contenant des composés de soufre ferreux en raison de l'action bactériologique

- ✓ **Acides organiques :**

Les acides organiques tels que l'acide acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certaines eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment. Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement moyennement agressifs et provoquent une dégradation lente [38].

- ✓ **Acides minéraux :**

Les acides chlorhydriques et nitriques réagissent avec la chaux de ciment et donnent des sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments portland. L'acide sulfurique H_2SO_4 est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{-2} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tel que le gypse et l'ettringite.

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif [38].



Figure 2.19 : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage [38].

Sources des acides :

Les milieux acides les plus fréquents sont :

- Eaux naturelles dans les tourbières et marécages où le pH peut chuter à 4.
- Environnements industriels : dans les industries chimiques ainsi que dans les industries agroalimentaires.
- Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton.
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton [39].

Les deux types d'agression par les produits chimiques :

✓ L'érosion chimique :

L'altération du béton par érosion chimique se produit lorsqu'il y a dissolution de l'un des composants de la pâte de ciment ou du granulat par un agent chimique extérieur. Il s'ensuit un lessivage du composant dissout : le béton devient alors de plus en plus poreux et perd de la matière en même temps que son rôle protecteur de l'armature.

Ce processus commence toujours à partir de la surface de contact avec l'agent chimique et progresse vers l'intérieur du béton.

✓ Le gonflement :

L'altération du béton par gonflement fait suite à la combinaison, à l'intérieur du béton, entre une substance chimique ayant pénétré depuis la surface, un constituant de la pâte de ciment, et l'eau des capillaires. Lorsque cette combinaison produit un composé solide dont le volume est supérieur à celui des constituants de départ, il en résulte des pressions internes qui peuvent provoquer un gonflement de la masse, associé à une fissuration lente, mais importante. Celle-ci peut se manifester jusqu'à une certaine distance du point de pénétration de la substance agressive [40].

2.6. Conclusion :

D'après le travail que nous avons mené , nous pouvons conclure que chaque type de fibre a une signification et une influence particulière sur le comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des utilisations spécifiques.

Nous avons vu aussi que les bétons renforcés de fibres métalliques, de verre et de polypropylène permettaient d'améliorer, sous certaines réserves, les capacités mécaniques du matériau initial béton.

Le béton est certes un corps inerte, mais il n'en évolue pas moins dans le temps, c'est un composé vivant subissant des changements constants : dilatations, fissures, maladies, ruptures et d'autres encore ! Le béton ne peut donc être simplement abandonné après avoir été coulé, il est comme nous, il va falloir en prendre soin. Nous avons donc passé en revue et appris les différentes attaques chimiques et physiques qui peuvent altérer le béton.

Chapitre 03 : Présentation de quelques travaux antérieures (mécanique et durabilité)

3.1. Introduction :

Pour répondre au problème posé, l'étude s'appuie sur des essais de structures réalisés pour, d'une part, étudier les mécanismes de rupture et, d'autre part, valider les modèles élaborés. Plusieurs essais sont ainsi effectués sur les caractéristiques mécaniques du béton de fibre.

Dans ce dernier chapitre, on va voir ce que disent les auteurs sur le béton fibré ainsi que les différents résultats obtenus sur les caractéristiques mécaniques et plus précisément sur la résistance à la compression et aussi sur la perte de masse.

3.2. Résultats obtenus par les auteurs (résistance à la compression et perte de masse) :

3.2.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression du béton de fibres métalliques est inférieure à celle d'un béton non fibré (Rossi et al., 1989b). Par ailleurs, Swamy et Managat (1974) ont montré, suite à une étude comparative entre le béton sans fibre et le béton de fibres métalliques, qu'une légère augmentation de l'effort maximum de compression en fonction de l'augmentation de la teneur en fibre est observée [41,42].

Dans le même ordre d'idées, Murali et al. (2014), confirment que l'ajout de fibres d'acier au béton peut améliorer de manière significative la résistance à la compression comparativement au béton témoin. Pour ces derniers, la fraction volumique optimale des fibres pour obtenir une résistance élevée est de 1,5%, afin de s'assurer qu'aucunes boules de fibres ne se forment qui aurait une incidence sur la consistance du béton [43].

En général, la résistance à la compression du béton renforcé par des fibres présente une légère augmentation en conformité avec le taux de fibres (Figure 3.1, à gauche) en raison de la microfissuration obstruée. Ce qui est plus important cependant, est l'augmentation de la déformation à la rupture et, en particulier, l'augmentation de la capacité d'énergie qui résulte du fait que la branche descendante de la courbe contrainte-déformation devient de plus en plus horizontale avec l'augmentation du dosage en fibres. Cependant, une

augmentation du rapport l/d de la fibre peut également se traduire par une capacité d'énergie plus élevée (figure 3.1, à droite) (Müller et Haist, 2009) [44].

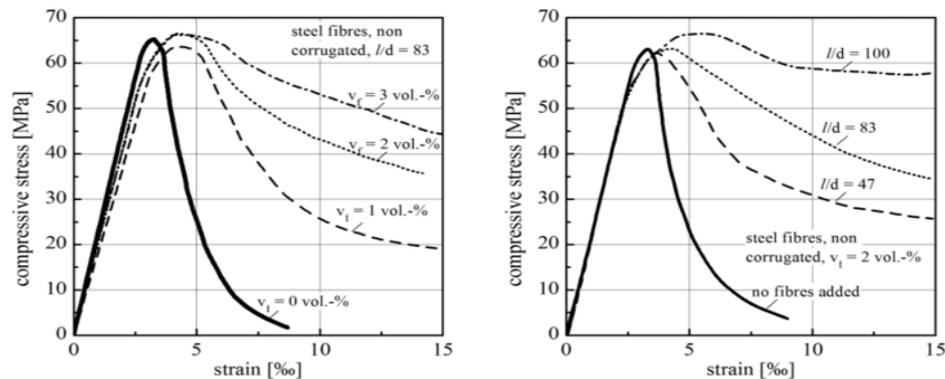


Figure 3.1 : Diagramme contrainte-déformation du béton renforcé avec différents pourcentages (à gauche) et rapports l/d de fibres (à droite) sous une charge de compression (ACI, 1988).

Également la Figure 3.2 montre que l'amélioration de la résistance à la compression du béton de fibre est liée au dosage en fibres, plus le taux de fibres est élevé plus la résistance à la compression augmente. Cependant, ces résultats sont enregistrés au-delà de quatre jours, puisque à cette date la résistance est semblable à celui d'un béton ordinaire. L'augmentation de la résistance à la compression du béton renforcé par des fibres au moment ultérieur est due à l'hydratation continue du ciment et à l'augmentation progressive de la force de liaison entre la matrice et les fibres (Chern et Young, 1989) [45].

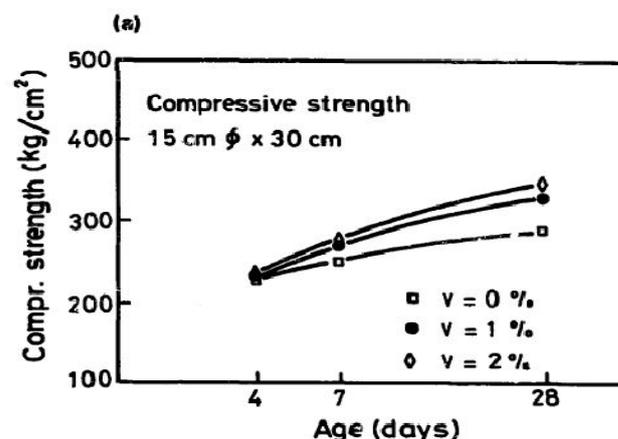


Figure 3.2: Résistance à la compression du béton à différents âges (Chern et Young, 1989).

Nombreux sont les paramètres qui influent sur la résistance à la compression du

béton desable de dunes renforcés par les fibres parmi lesquelles on trouve :

- Le pourcentage et la longueur des fibres métalliques ;
- Le rapport longueur/diamètre (l/d) ;
- La rigidité des fibres.

- **L'effet du pourcentage et la longueur des fibres métalliques**

Les résultats exposés sur les Figure 3.3, 3.4 et 3.5 montrent une amélioration de la résistance à la compression pour les différents mélanges des bétons de sable de dunes renforcé par des fibres métalliques issues de pneus usés (BSD_f) par rapport aux bétons de sable et de dunes témoins (BSD).

D'un autre côté, il a été remarqué que la résistance à la compression pour la mixture 1.5BSD_f₁ est supérieure par rapport à celle de 1.0BSD_f₁ de 2,0%. Confirmant ainsi que l'accroissement de la teneur en fibres f₁ améliore légèrement la résistance à la compression.

Pour les fibres f₂, une augmentation relativement importante de la résistance à la compression pour les BSD_f₂ par rapport au BSD à 180 jours a été remarquée (Figure 3.4), d'environ 22% et 28% respectivement pour les mixtures 1.0BSD_f₂ et 1.5BSD_f₂. Cette augmentation est due au fait que, la longueur des fibres f₂ est largement supérieure à la largeur du moule (40 x 40 x 160 mm³). De ce fait, les fibres ont tendance à s'orientées dans le sens de la longueur des éprouvettes du béton. Par conséquent, au moment de l'écrasement de ces dernières la charge appliquée sera perpendiculaire aux fibres, réduisant ainsi la propagation de la fissuration, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la compression [83].

Giaccio et Zerbino (2005) avaient observé une augmentation de la résistance à la compression de près de 20% en raison de la présence des fibres [46]. En outre, Yang et al. (2007) ont constatés que les fibres introduites à différents pourcentages dispersées dans le béton augmentent la résistance à la compression [47]. Quant à Luo et al. (2001), ils ont observés une augmentation importante de 61% de la résistance à la compression de la matrice renforcée de fibres par rapport à celle sans fibres [48]. L'étude de Köksal et al. (2008), montre que les forces de compression des bétons produites par l'addition de fibres en acier et fumées de silice sont plus élevées que celles contenant uniquement de la fumée de silice [49].

Bentalha et Houari (2007) et Bentalha (2007) ont signalé qu'un ajout de fibres

dans le béton améliore la résistance à la compression, cette amélioration peut atteindre jusqu'à 20% [50].

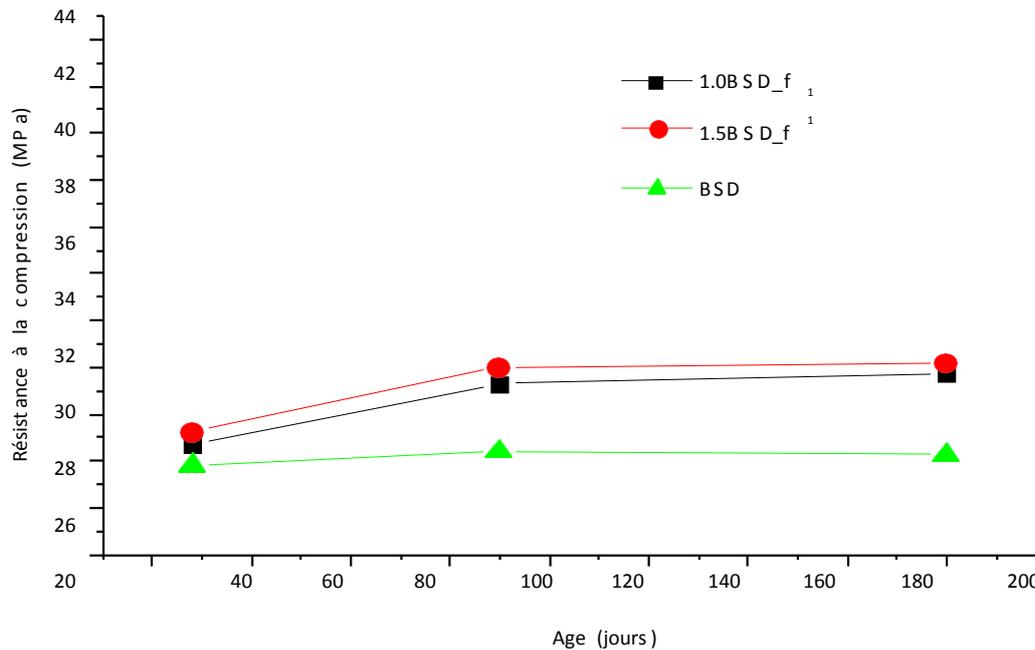


Figure 3.3 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_1) [83].

La Figure 3.3 montre une augmentation de la résistance à la compression du mélange BSD_{f₁}, par rapport au béton témoin, allant de 11 à 13%, pour les dosages en fibres respectifs de 1.0 et 1.5% à 180 jours. Cette augmentation est due à la présence des fibres avec une orientation préférentielle à l'intérieur de la matrice, ayant comme conséquence une augmentation de la résistance à la compression. D'un autre côté, il a été remarqué que la résistance à la compression pour la mixture 1.5BSD_{f₁} est supérieure par rapport à celle de 1.0BSD_{f₁} de 2,0%. Confirmant ainsi que l'accroissement de la teneur en fibres f_1 améliore légèrement la résistance à la compression.

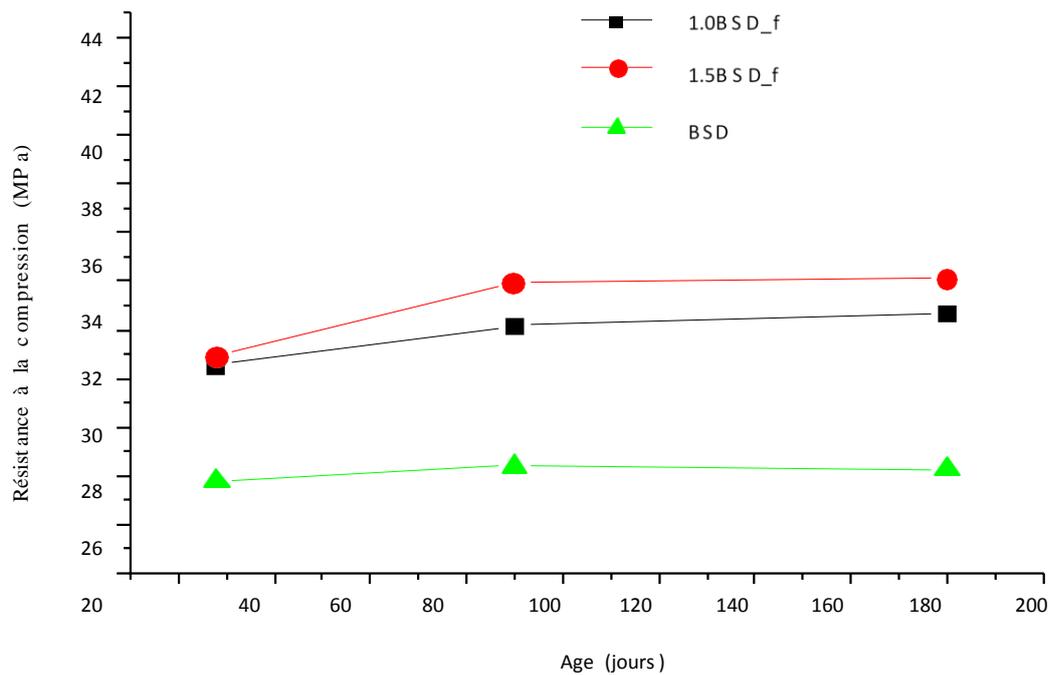


Figure 3.4 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_2) [83].

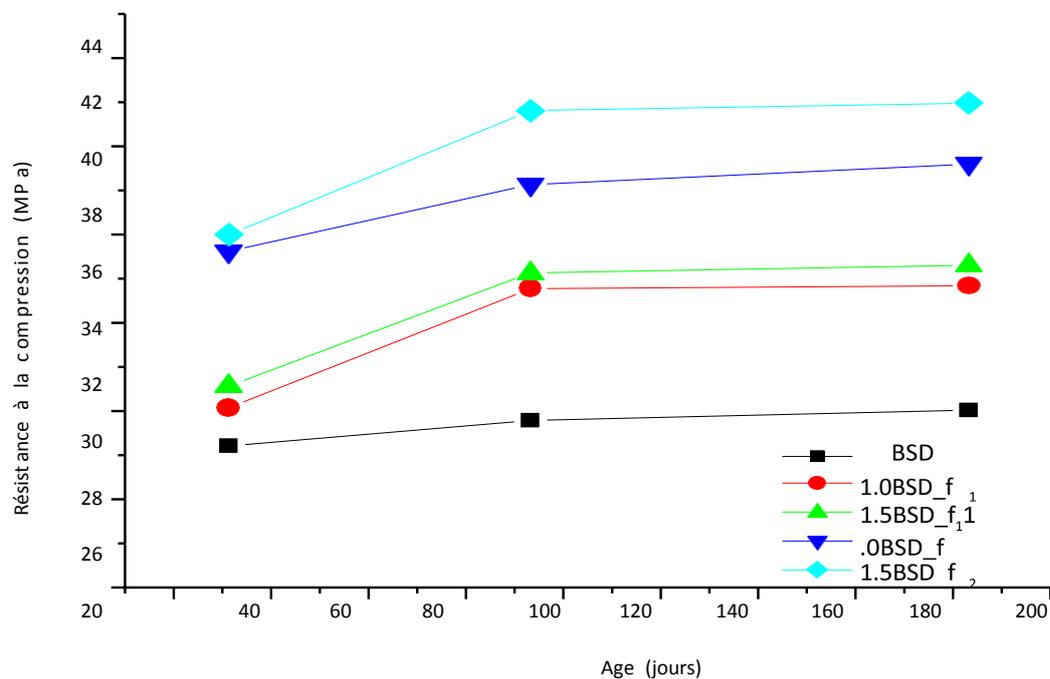


Figure 3.5 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibres f_1 et f_2) [83].

Identiquement, que les mélanges réalisés avec l'introduction des fibres f_1 , les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression du mélange 1.5BSD_f₂ est supérieure à celle de 1.0BSD_f₂ d'environ 6%. En effet,

l'influence du pourcentage en fibres est plus importante pour la fibre f_2 que pour la fibre f_1 . Ce résultat est dû essentiellement à l'influence à la fois de la longueur et du nombre de fibres orientées suivant le sens préférentiel, se traduisant par une résistance à la compression plus élevée du béton renforcé par les fibres f_2 par rapport au béton renforcé par les fibres f_1 (Figure 3.5).

Dans le même contexte Hamidi et Koohdaragh (2011), ont conclu qu'en comparant la moyenne de la résistance à la compression affectée par l'utilisation des fibres dans différentes directions, que l'utilisation de la fibre d'acier perpendiculaire à la direction de la force provoque une augmentation de la résistance à la compression du béton, mais l'utilisation de la fibre d'acier suivant la direction de la force n'avait pas d'effet remarquable sur la résistance du béton. D'un autre côté, il est bien connu que l'une des propriétés importantes du béton renforcé de fibres en acier est sa résistance à la fissuration (Holschemacher et al., 2010) [51, 52].

Selon Giaccio et Zerbino (2005), sous l'effet de la charge de compression uniaxiale, d'importantes fissures sont produites dans le béton pendant l'étape finale du régime avant le pic. La présence des fibres dans la matrice freine la propagation des fissures [53].

Dans leur étude, Neves et de Almeida (2005), attestent que le renforcement du béton par des fibres peut fonctionner à la fois au niveau micro et macro. Au niveau micro, les fibres peuvent stopper le développement de microfissures, conduisant ainsi à des forces de compression plus élevées, alors qu'au niveau macro les fibres contrôlent l'ouverture des fissures, augmentant ainsi la capacité d'absorption de l'énergie du composite [54].

Pour les mélanges de bétons réalisés avec l'incorporation des fibres f_3 , la Figure 3.6 montre une augmentation importante de la résistance à la compression du BSD_ f_3 par rapport au béton sans fibres à 180 jours, d'environ 37% pour la mixture 1.0BSD_ f_3 et 55% pour la mixture 1.5 BSD_ f_3 . La valeur maximale de la résistance à la compression des bétons de sable de dunes renforcés de fibres (BSD_f) est enregistré pour le mélange ayant un dosage en fibres f_3 de 1.5% (1.5BSD_ f_3) par rapport à l'ensemble des BSD_f préparés avec l'incorporation des fibres f_1 et f_2 .

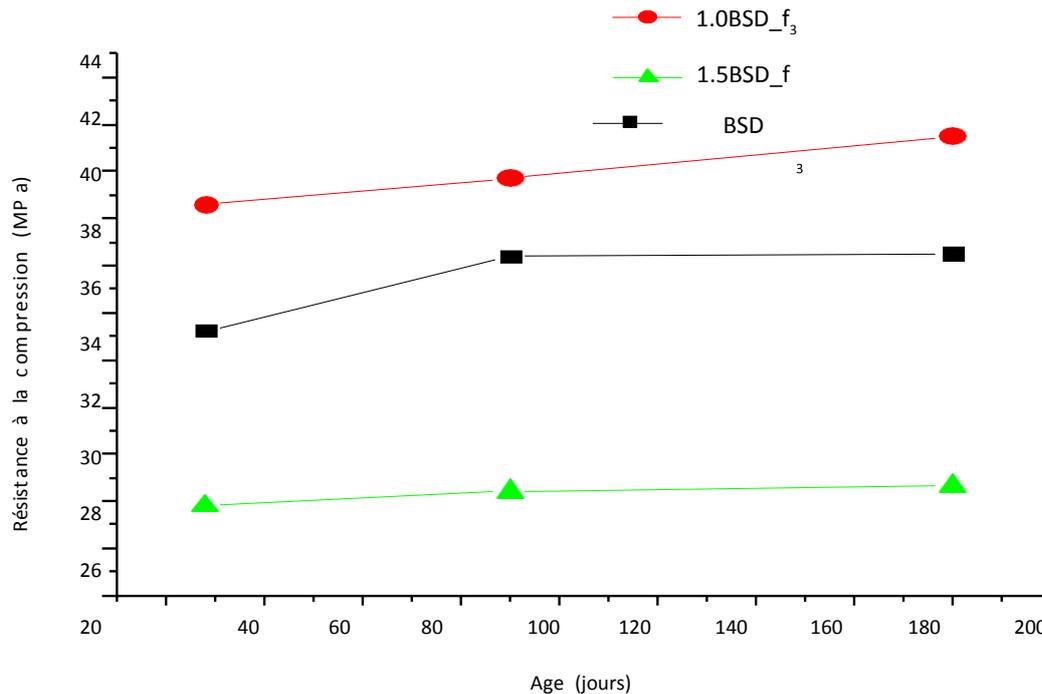


Figure 3.6: Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_3) [83].

Cette augmentation aussi significative est due vraisemblablement à l'excellente liaison entre les fibres et la matrice cimentaire, ainsi qu'à leurs nombres élevés, du fait de leurs faibles diamètres, conduisant à la création d'un réseau plus dense et solidaire. Stoppan ainsi le développement et la propagation des microfissures et empêchant l'apparition des macro-fissures.

D'après l'ensemble des résultats trouvés, il est plus que clair dans ce travail, que la quantité de fibres se traduisant par le pourcentage d'incorporation des fibres dans les bétons, joue un rôle positif dans l'amélioration de la résistance à la compression. La Figure 3.7 présente une influence distinctement visible du pourcentage de fibres sur l'ensemble des mixtures, où nous remarquons qu'il y a effectivement une amélioration plus importante de la résistance à la compression des bétons réalisés avec un taux d'introduction de fibres de 1.5% par rapport à ceux réalisés avec un pourcentage de 1.0% [83].

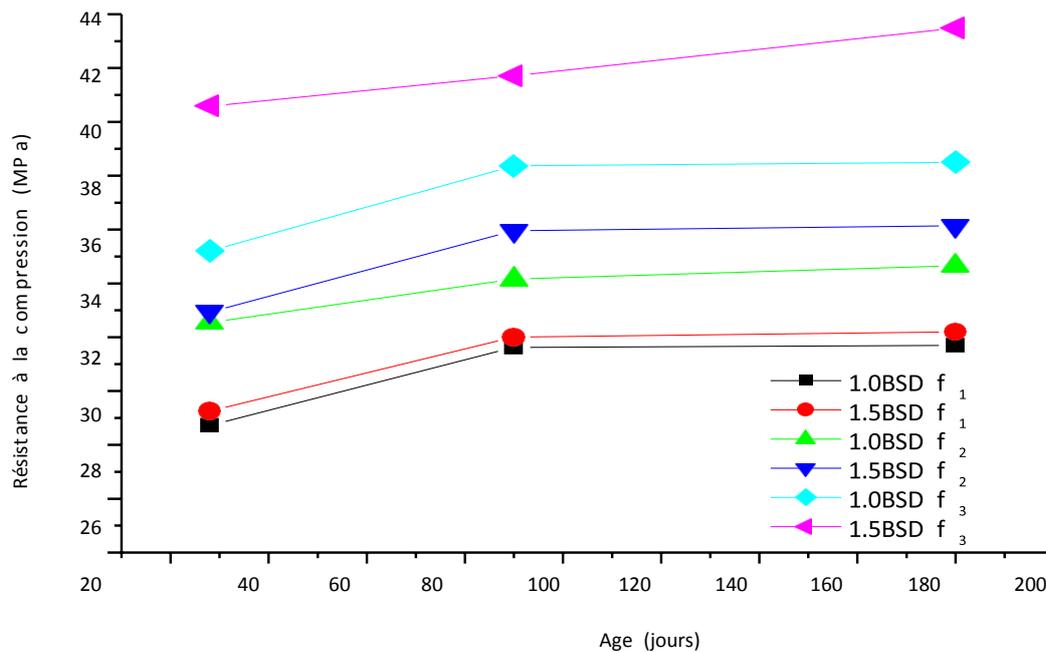


Figure 3.7 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_1 , f_2 et f_3) [83].

Néanmoins, nous distinguons que le mélange réalisé avec un dosage de 1% en fibres f_3 , montre une amélioration de la résistance à la compression plus importante par rapport à ceux effectués avec un dosage de 1.5% en fibres f_1 et f_2 . Ceci est expliqué comme nous l'avons déjà mentionné précédemment à leurs faibles diamètres, se traduisant notamment par un nombre important de fibres du type f_3 à un dosage de 1% par rapport à ceux de f_1 et f_2 avec un dosage de 1.5%.

Dans le même contexte, Neves et de Almeida (2005) témoignent qu'un plus grand nombre de fibres dans la matrice, entraîne une probabilité plus élevée que la microfissure sera interceptée par une fibre [54].

Même chose, Holschemacher et al. (2010), indiquent que la force de compression augmente à mesure que la teneur en fibres est élevée. Et que la résistance à la compression pour tous les échantillons de béton renforcé de fibres en acier à haute résistance a été plus élevée que celui sans fibres [52].

Selon une étude expérimentale réalisée par Aït-Tahar (2001), à travers laquelle il indique que la résistance à la compression est peu influencée par la présence de fibres ; pour un pourcentage de fibres $V_f = 1\%$, l'augmentation de la résistance à la compression est de l'ordre de 21,7%, pour un volume en fibres $V_f = 2\%$, une augmentation de 39% est observée et pour $V_f = 3\%$, un accroissement de l'ordre de 52% est obtenu, par rapport au béton témoin. A notre avis, ces résultats

montrent qu'il y a effectivement une amélioration de la résistance à la compression du béton fibré par rapport au béton témoin chaque fois qu'il y a une augmentation du dosage en fibres [55].

Selon une synthèse sur plusieurs études menées avec le centre d'études du bâtiment et des travaux publics (CEBTP) en France, Absi (1994), a signalé que les chercheurs ont constaté que le comportement du béton fibré en compression diffère du béton sans fibres selon le type et le volume de fibres. D'autres chercheurs ont constaté que la résistance à la compression augmente avec l'introduction de fibres métalliques dans le béton (tests effectués sur des éprouvettes cylindriques $16 \times 32 \text{ cm}^2$) [56].

•L'effet de l'élanement (l/d)

Les Figure 3.8 et 3.9 montrent l'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression à 28, 90 et 180 jours des bétons renforcés de fibres métalliques issues de pneus usés avec les dosages en fibres de 1.0 et 1.5%. Suivant les résultats obtenus on remarque qu'il y a une proportionnalité évidente entre l'amélioration de la résistance à la compression et l'augmentation du rapport l/d. L'introduction des fibres (f_1 , f_2 et f_3) ayant respectivement les élanements $\lambda_1 = 33,33$; $\lambda_2 = 66,66$ et $\lambda_3 = 142,86$ dans le béton, montrent que la résistance à la compression augmente à mesure que le rapport l/d devient plus élevé, cette augmentation est observée pour les différents âges (28, 90 et 180 jours).

Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Köksal et al., (2008). Où ces derniers affirment que les valeurs de la résistance à la compression des bétons ayant un élanement égal à 80, ont été supérieures à celles des bétons avec un élanement égal à 65, avec la même quantité de fibres d'acier et fumée de silice [49].

Neves et de Almeida (2005), ont rapporté que l'incorporation des fibres ayant une longueur de 30 mm, un diamètre de 0,38 mm et un élanement de 80, améliore la résistance à la compression du composite de plus de 9%, un autre type de fibres avec une longueur de 30 mm, un diamètre de 0,55 mm et un élanement de 55, réduit la résistance à la compression du composite de 20%. Ceci montre l'influence de l'élanement sur l'amélioration de la résistance à la compression, plus le rapport l/d augmente plus la résistance à la compression devienne importante [54].

Dans le même contexte Marar et al. (2011) attestent que l'augmentation maximale de la résistance à la compression est de 33,7% obtenue par un béton

renforcé par des fibres d'acier, ayant un rapport l/d de 83 et un taux de dosage en fibres de 2.0%, par rapport au béton témoin. Pour les mélanges avec les rapports l/d de 60 et 75, l'augmentation maximale de la résistance à la compression est de 24,3 et 28,2%, respectivement obtenues avec un dosage en fibres de 2.0%, par rapport au béton témoin [57].

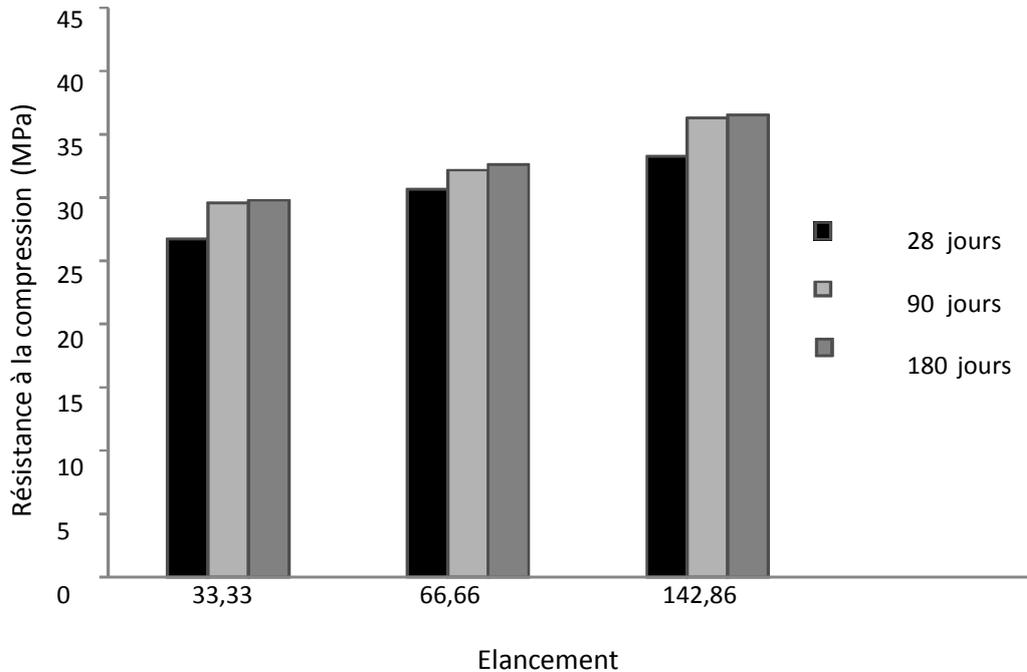


Figure 3.8 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression ($V_f = 1.0\%$) [83].

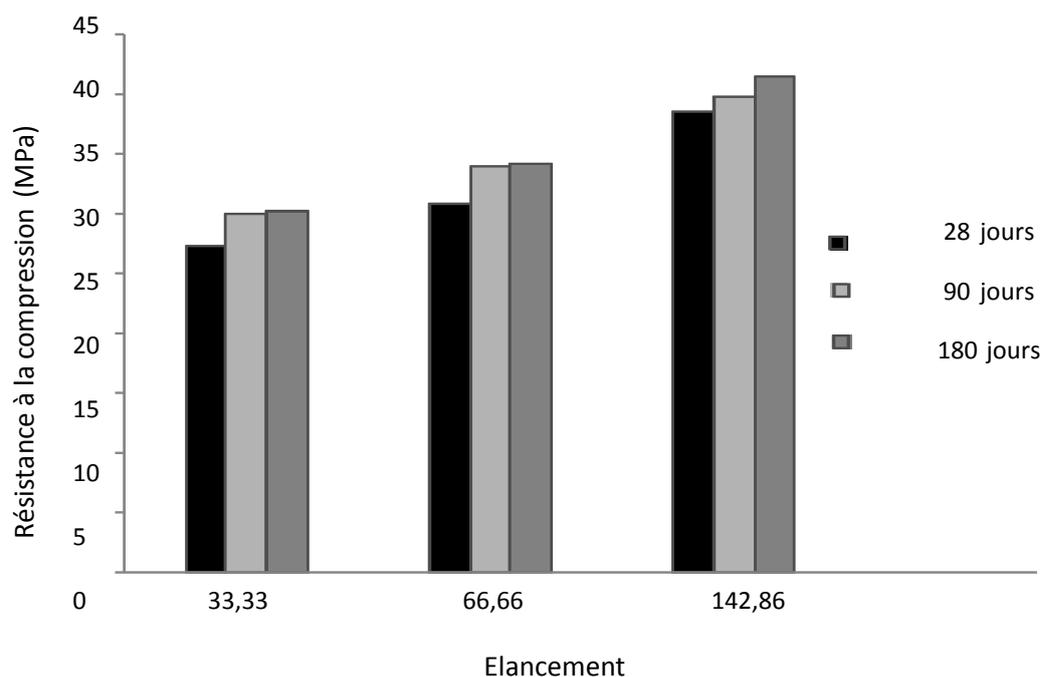


Figure 3.9 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression ($V_f = 1.5\%$) [83].

•L'effet de la rigidité des fibres

Les Figure 3.10 et 3.11 présentent l'influence du module d'élasticité des fibres utilisées sur la résistance à la compression des bétons de sable de dunes. Une amélioration de cette dernière a été observée avec l'augmentation du module d'élasticité. L'introduction dans le béton des fibres f_3 ayant le module d'élasticité le plus élevé affiche les meilleurs résultats de la résistance à la compression par rapport à l'ensemble des bétons de sable de dunes expérimentés.

En effet, la rigidité des fibres contribue à l'amélioration de la résistance à la compression du béton. Cependant, malgré le fait que les fibres f_1 et f_2 ont le même module d'élasticité, l'introduction de la fibre f_2 dans le béton donne une résistance à la compression supérieure à celle de l'incorporation de la fibre f_1 , cela est due certainement à l'influence de la longueur des fibres f_2 , qui est plus importante par rapport aux fibres f_1 ($l(f_2) = 2l(f_1)$). En conséquence, les dimensions et plus particulièrement la longueur dans ce cas l'emportent sur l'effet du module d'élasticité.

Dans le même contexte Neves et de Almeida (2005) indiquent que, si la fibre est assez rigide et bien adhérente à la matrice, c'est à ce moment qu'elle peut

empêcher le développement des microfissures [54].

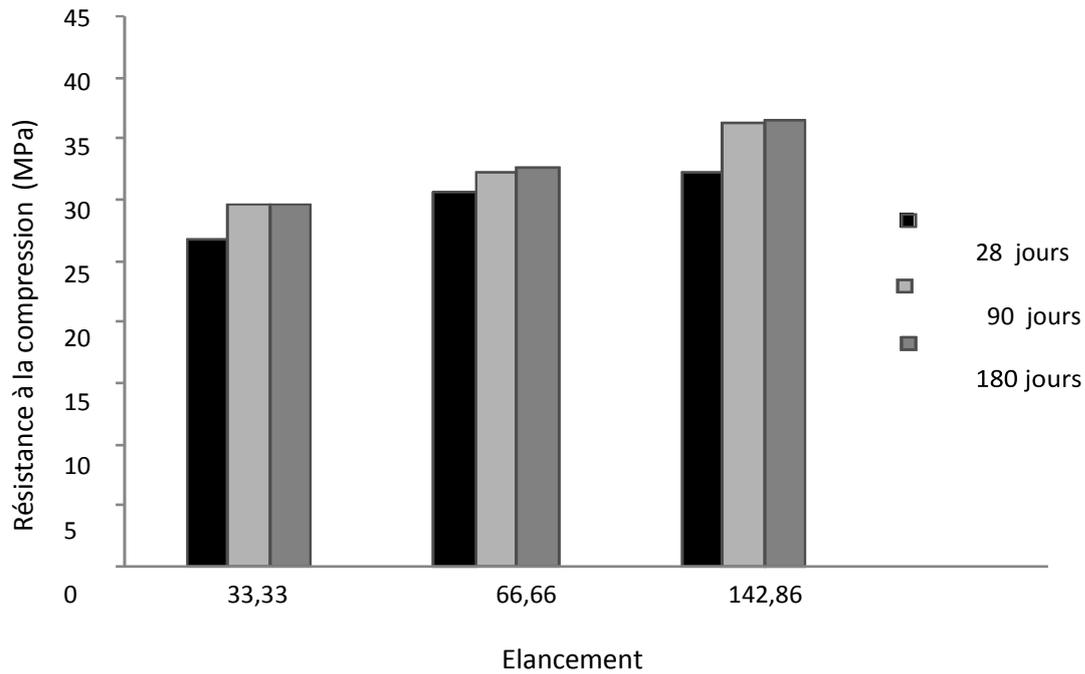


Figure 3.10 : L'effet de la rigidité sur la résistance à la compression ($V_f = 1.0\%$) [83].

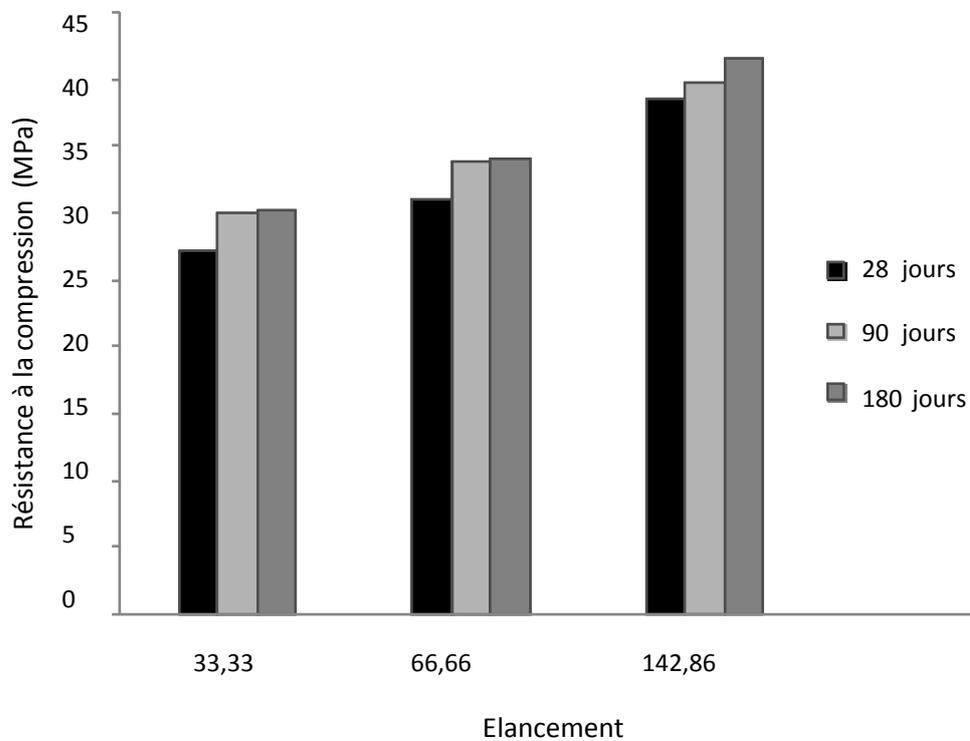


Figure 3.11 : L'effet de la rigidité sur la résistance à la compression ($V_f = 1.5\%$) [83].

Dans le même ordre d'idées, Rivaz (2006) atteste que, le module de Young des fibres régit le mode de défaillance après observation des fissures. Même chose pour Rossi (2009) qui confirme, que lorsque le module de Young des fibres augmente les fissures créées diminuent [58].

Dans leur étude Hsie et al. (2008), ont conclu que le béton renforcé de fibres de polypropylène hybride présente la meilleure augmentation de la résistance à la compression. La raison est que la fibre monofilament a le module d'élasticité élevé et une rigidité de la forme à l'état brute [59].

•Influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique et physique du BAP soumis à une température élevée :[63]

Les formulations des bétons réalisés sont les suivantes :

BAPT : BAP sans fibre

BAPF1 : BAP avec 0.3% de fibres FIBERTEK A

BAPF2 : BAP avec 0.4% de fibres FIBERTEK A

BAPF3 : BAP avec 0.5% de fibres FIBERTEK A

BAPFD1 : BAP avec 0.3% de FIL D'ATTACHE

BAPFD2 : BAP avec 0.4% de FIL D'ATTACHE

BAPFD3 : BAP avec 0.5% de FIL D'ATTACHE

BAPM1 : BAP avec 0.3% mélange de 50% de FIBERTEK A et 50% de FIL D'ATTACHE

BAPM2 : BAP avec 0.4% mélange de 50% de FIBERTEK A et 50% de FIL D'ATTACHE

BAPM3 : BAP avec 0.5% mélange de 50% de FIBERTEK A et 50% de FIL D'ATTACHE

Les fibres FIBERTEK A sont obtenues par étirage à froid de fil d'acier de haute résistance avec mise en forme spéciale pour obtenir le meilleur ancrage sur toute leur longueur.

La figure 3.12 regroupe l'ensemble des résultats concernant l'évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction des températures.

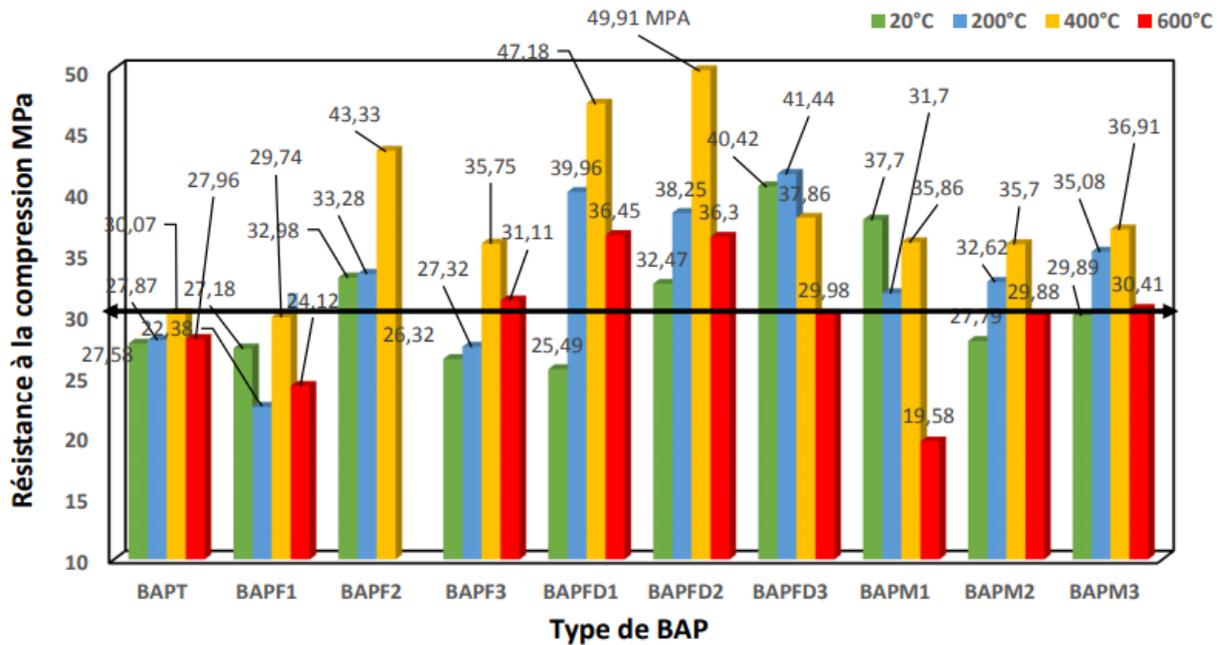


Figure 3.12: Évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction des températures [63].

-Le premier constat est l'absence d'écaillage dans le BAPF juste une fissuration cette absence s'explique par l'action des fibres sur la microstructure.

-Le mélange de fibres de crochet et de fibres minérales (fil d'attache) conduit à une amélioration de la résistance mécanique par rapport au BAPT pour toutes les doses. En ce qui concerne l'hybridation des fibres, les essais en compression ont montré que l'association des fibres apportait à la fois un gain de ductilité et une augmentation de la résistance.

-On observe un léger gain de résistance à la compression dans tous les BAP entre 20°C et 200°C.

- La résistance à la compression à 400 ° C pour tous les BAP et BAPM3 est la meilleure à 22,75%, Le BAPM2 a réalisé un gain de 18,72% par rapport au BAPT, on explique ceci par l'effet du taux de fibre sur la résistance à la compression.

- À 600 ° C, il y a une diminution de la résistance dans tous les BAP, mais par rapport aux BAPT une augmentation de la résistance pour BAPFD1, BAPFD2 et BAPFD3 de 30,36%, 29,82% et 0,22%, respectivement. Cette diminution de la résistance est due à la dégradation combinée de la matrice de ciment et à la dégradation des agrégats provoquant une fissuration importante. Pour les BAP fibrés, la baisse de résistance est moins importante que pour le béton témoin, et

les valeurs de résistance à 600 ° C ne sont pas très faibles que pour le dernier. On peut donc dire que les fibres ont un effet positif sur la résistance à la compression des BAP exposés à des températures élevées.

- BFM à l'état durci :

Comportement en compression :

[Setti F., Ezziane K., Setti B., 2012] ont observé que la résistance à la compression change avec le temps ; quelle que soit la dose de fibre utilisée (Figure 3.14). Ce gain dépend de la concentration et de la géométrie de ces fibres et atteint au bout de 7 jours sa valeur maximale de 11, 21 et 29% à une dose volumique de fibres de 0,5, 1 et 1,5%, respectivement. Cette amélioration est attribuée à l'adhérence mécanique des fibres, ce qui augmente la capacité de retarder la formation de fissures et d'arrêter la propagation de celles-ci [64].

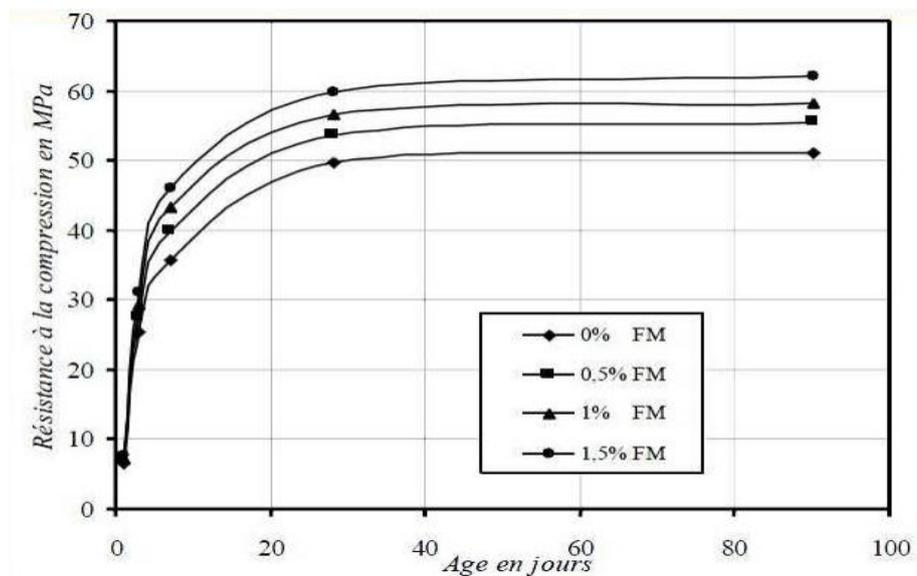


Figure 3.13: Évolution du gain de résistance en compression du béton renforcé de fibres [64].

- Effet de la fibre de polypropylène sur la résistance à la compression :

Pour étudier l'effet de la fibre sur la résistance à la compression du béton, les pourcentages de fibre de polypropylène ont été choisis de 0 à 0,1%, 0,2%, 0,3% et 0,5% en poids de ciment. Le Tableau 3.2 récapitule les résultats de la résistance à la compression du béton pour tous les échantillons. À partir de ce tableau, il est montré que l'ajout de la fibre de polypropylène (PF) au mélange de béton a une influence sur la résistance à la compression du béton. L'augmentation maximale de la résistance à la compression était de 16%, 11% et

7% pour les mélanges A, B et C, respectivement, celle qui se produit lorsque le pourcentage de fibre de polypropylène augmente jusqu'à 0,2%. On peut noter également que la résistance à la compression est diminuée si la quantité de fibres dépasse 0,2% pour les trois mélanges. L'augmentation de la résistance à la compression peut être attribuée à l'augmentation de la force de liaison entre les composants du mélange de béton en raison de la présence de fibres [65].

L'augmentation du pourcentage de fibre au-delà de 0,2% a entraîné une diminution de la résistance à la compression. Cette diminution peut être attribuée à la masse de fibres non contiguës et cela rend la résistance de la matrice de béton contre la formation de fissures très faible. Une autre explication possible de la diminution de la résistance à la compression est que des pourcentages élevés de fibres peuvent affecter négativement le processus d'hydratation du ciment, ce qui à son tour rend le béton très vulnérable à la formation de fissures. Les figures 3.14 et 3.15 montrent la relation entre la fibre de polypropylène et la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les mélanges A, B et C. Les résultats indiquent que la résistance du béton avec PF augmente jusqu'à 0,2% de PF; au-delà de ce pourcentage, la force a commencé à décliner. En autres termes, 0,2% est le pourcentage optimal qui peut être ajouté pour améliorer la résistance à la compression du béton. Les valeurs maximales de la résistance à la compression à 28 jours étaient de 38,8 MPa, 32 MPa et 21,45 MPa à 0,2% de PF pour les mélanges A, B et C, respectivement. Enfin, on peut conclure que la meilleure fourchette de pourcentages de fibre de polypropylène est comprise entre 0,1% et 0,2% [65].

Tableau 3.1 : L'effet du PF sur la résistance à la compression du béton [65].

Specimen	fcu (MPa) 7-days	fcu (MPa) 28-days
CU-0_A	21.9	33.4
CU-0.1_A	23.65	37.33
CU-0.2_A	23.76	38.8
CU-0.3_A	23.78	35.6
CU-0.5_A	20.2	33.3
CU-0.0_B	18.2	28.93
CU-0.1_B	20.1	30.4
CU-0.2_B	21.9	32
CU-0.3_B	18.3	28.2
CU-0.5_B	13.5	25.4
CU-0.0_C	7.2	20.1
CU-0.1_C	10.5	20.6
CU-0.2_C	12.5	21.45
CU-0.3_C	11.5	20.3
CU-0.5_C	7.6	12.8

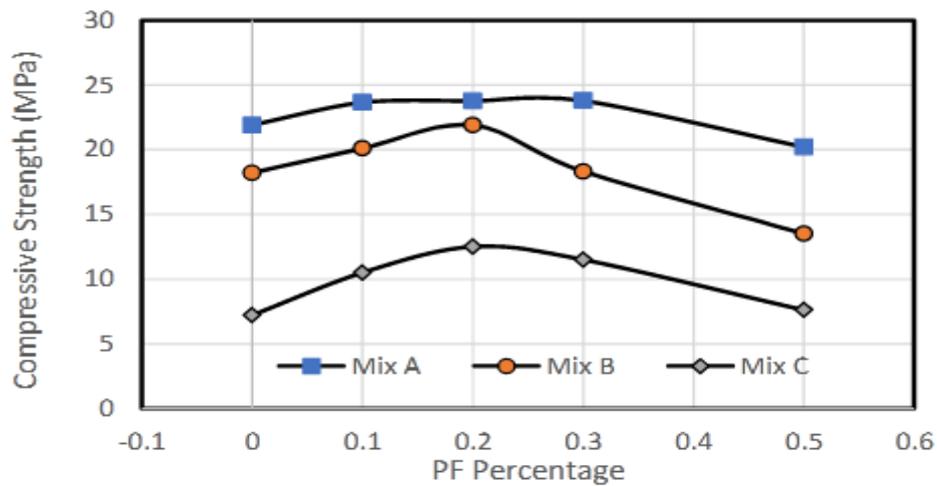


Figure 3.14 : Effet du PF sur la résistance à la compression du béton à 7 jours [65].

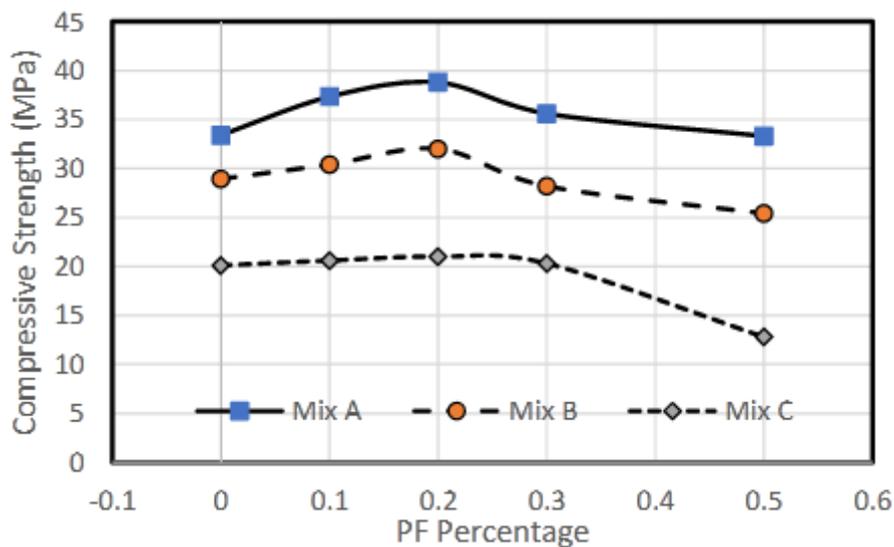


Figure 3.15 : Effet du PF sur la résistance à la compression du béton à 28 jours [65].

•Effet de la fibre de verre sur la résistance à la compression du béton :

L'effet de l'ajout de fibres de verre (FV) pour différents rapports sur la résistance à la compression du béton a été étudié en testant des cubes de dimensions standard conformes à la norme BS 12390. Les cubes ont été testés à l'âge de 3, 7, 28 et 56 jours. Les résultats obtenus sont présentés sur les Figures 3.16 et 3.17 [66].

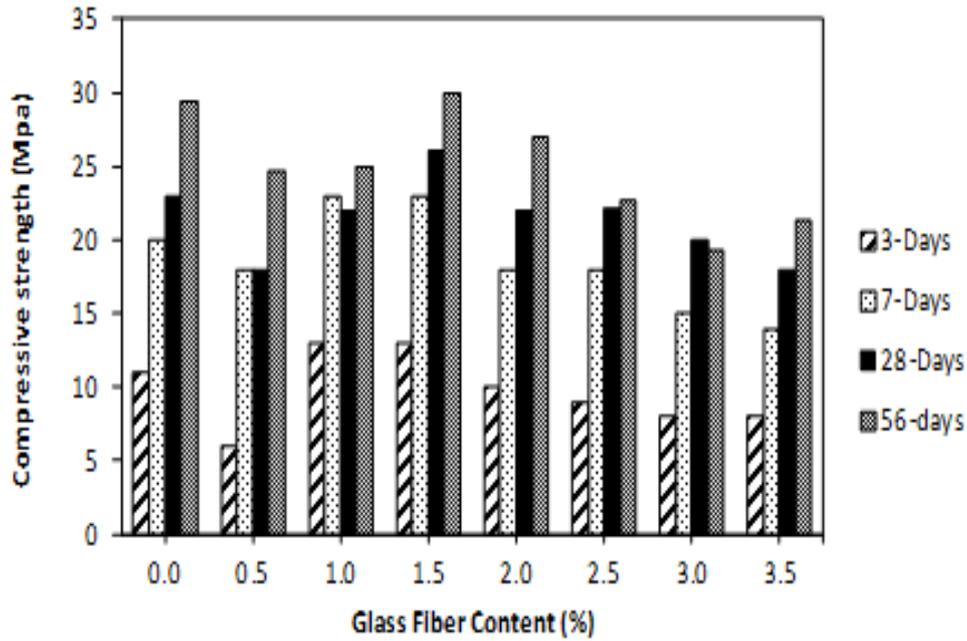


Figure 3.16 : Variation de la résistance à la compression du cube en fonction de la teneur en fibre de verre [66].

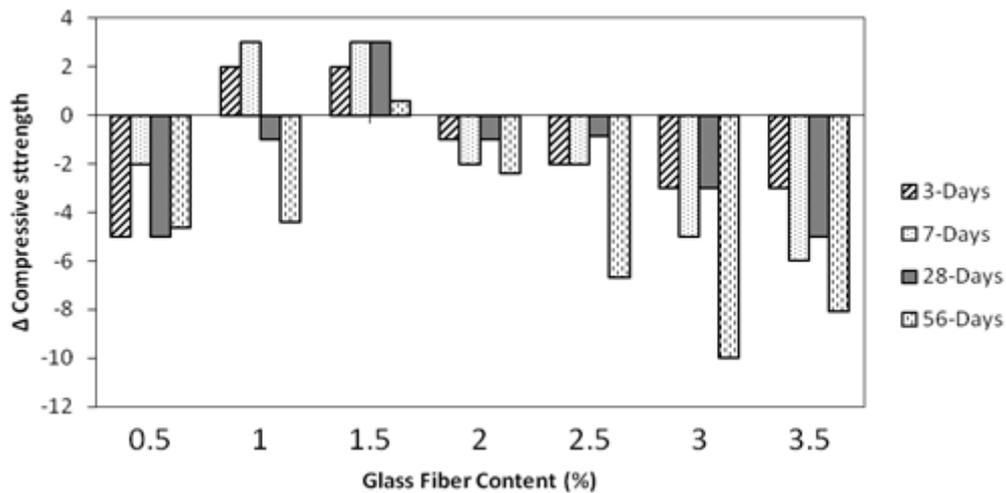


Figure 3.17 : Augmentation/diminution de la résistance à la compression du cube avec la teneur en fibre de verre [66].

Les résultats des figures 3.16 et 3.17 montrent qu'il y a une augmentation marginale de la résistance à la compression à 3 et 7 jours pour 1% d'addition de FV tandis que la résistance à la compression augmente à tous les âges pour une addition de 1,5% de teneur en FV par rapport à l'échantillon témoin. Cependant, la résistance à la compression à 56 jours n'a que 2% d'augmentation nette par

rapport à l'échantillon témoin. D'autres pourcentages de fibre de verre montrent une réduction de la résistance à la compression par rapport au mélange témoin. La résistance à la compression à un rapport de mélange de 1,5% de la teneur en FV est de 18%, 15%, 13% et 2% supérieure à celle du béton ordinaire à 3, 7, 28 et 56 jours respectivement. Shakor et al. ont également travaillé sur béton armé de fibre de verre (GFRC) en 2011 et ils ont conclu que la résistance à la compression est maximale à 1,5% d'addition de fibres de verre en poids de ciment [66].

3.2.2. Perte de masse :

•Evolution de la Perte en poids en fonction du temps :

La perte en poids en fonction d'âge des éprouvettes après 730 jours de séchage est présentée sur les Figure 3.18, 3.19, 3.20 et 3.21. Où nous pouvons distinguer que la perte en poids est plus importante pour l'ensemble des bétons de sable renforcés par des fibres métalliques issues de pneus usés par rapport aux bétons de sable sans fibres. Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Mesbah et Buyle-Bodin (1999) et Beddar et Belagraa (2003) [60, 61].

Les Figure 3.18 , 3.19, 3.20 et 3.21 montrent également que la perte en poids est plus importante pour les bétons de sable renforcés de fibres métalliques avec un dosage en fibres de 1% par rapport aux bétons de sable renforcés de fibres avec un dosage de 0,5%. Ce phénomène peut s'expliquer par la présence des fibres dans le béton menant à la création des chemins préférentiels favorisant l'élimination de l'eau, laquelle est plus importante avec l'augmentation du dosage en fibres.

Nous pouvons distinguer aussi suivant ces Figures, que dans le premier palier plus particulièrement entre 7 et 60 jours, qu'il y a une augmentation de la perte en poids, par contre au-delà de 60 jours et jusqu'à 730 jours une diminution de la perte en poids qui a tendance à se stabilisée pour l'ensemble des mélanges. Selon Pihlajavaara (1977), lorsque la carbonatation et le séchage s'installent en même temps, on observe une augmentation de la masse en raison de la fixation du dioxyde de carbone [62].

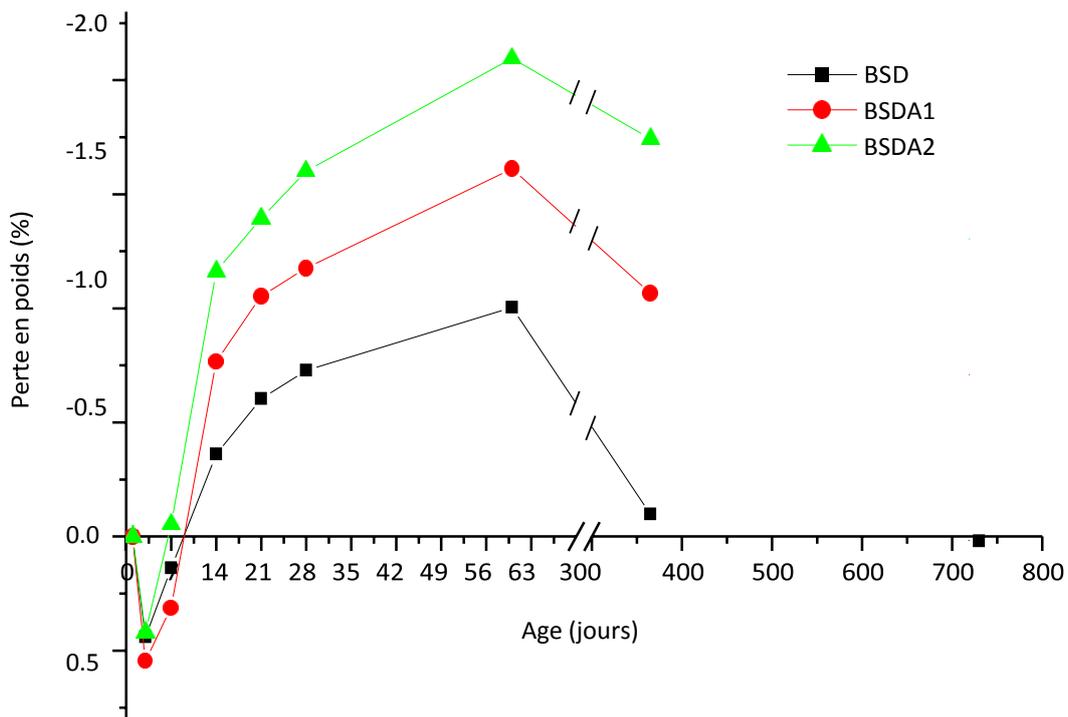


Figure 3.18 : Perte en poids en fonction d'âge pour les bétons témoins [83].

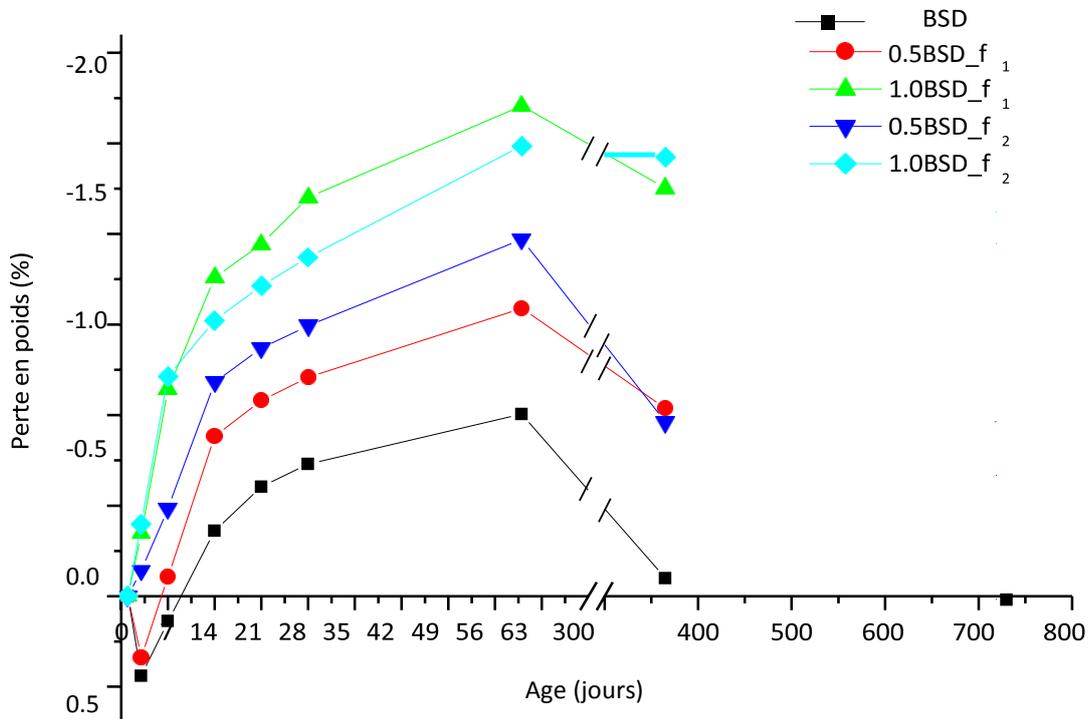


Figure 3.19 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSD [83].

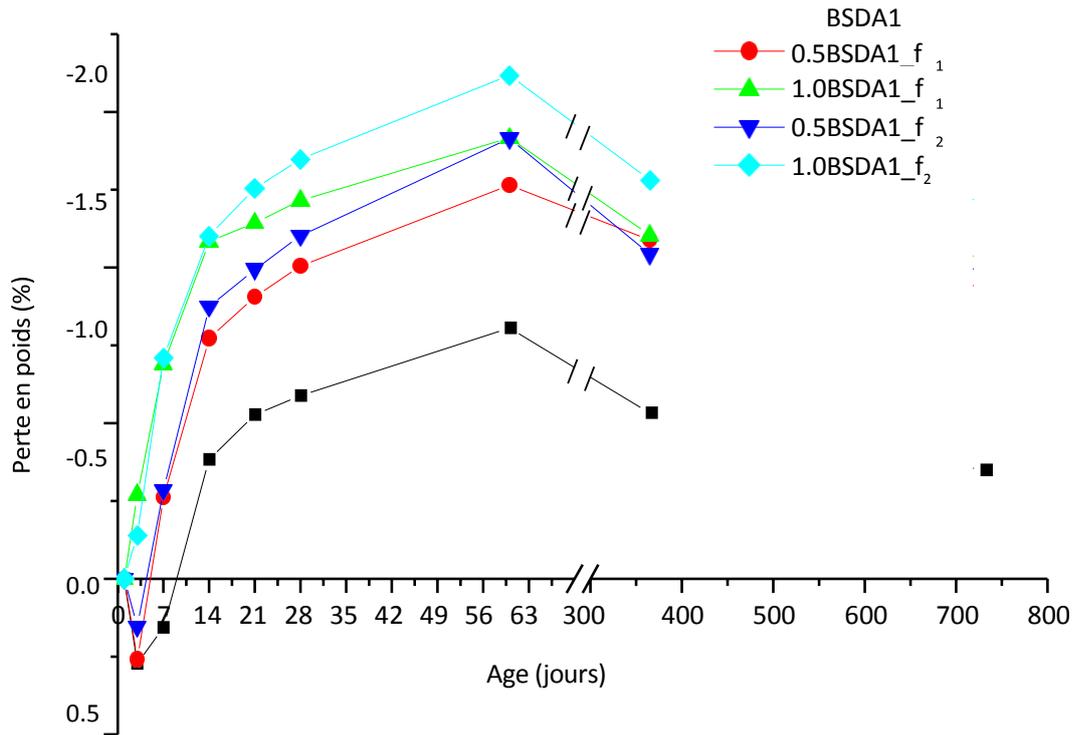


Figure 3.20 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSDA1 [83].

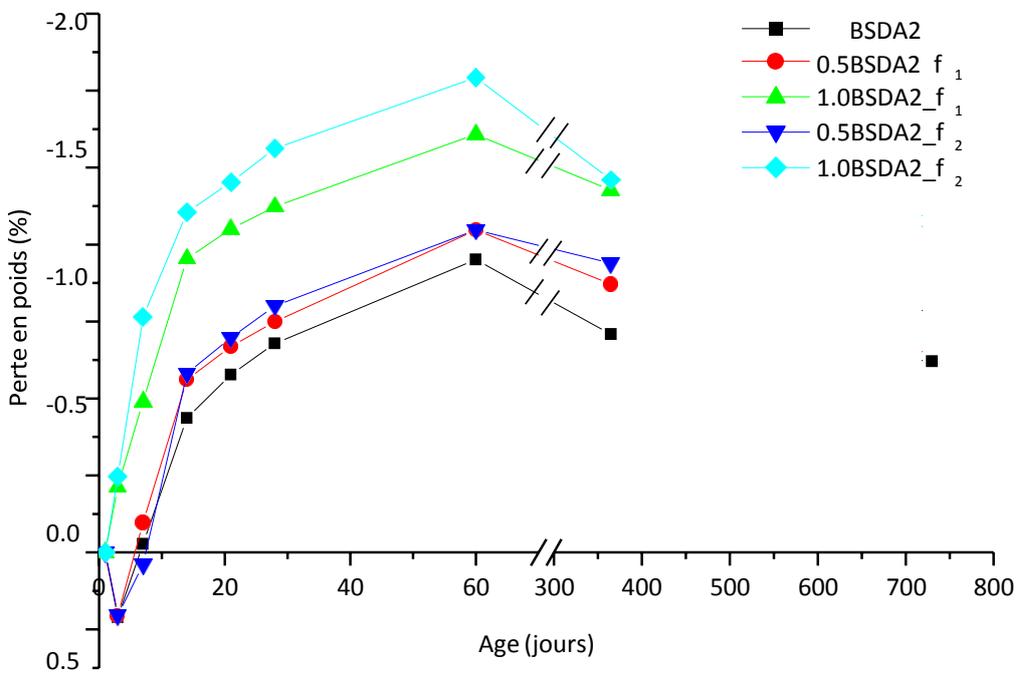


Figure 3.21 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSDA2 [83].

•**Evolution du retrait en fonction de la perte en poids :**

D'après les Figure 3.22, 3.23, 3.24 et 3.25 représentant le retrait en fonction de la perte en poids après 730 jours, nous pouvons remarquer que la perte en poids des bétons de sable renforcés par des fibres est plus importante par rapport aux bétons sans fibres.

D'un autre côté, nous pouvons distinguer d'après l'allure des courbes qu'il y a eu une reprise de poids pour l'ensemble des mélanges entre 60 et 730 jours. Ce phénomène d'après Mesbah et Buyle-Bodin (1999), peut être lié à la carbonatation et expliqué par la porosité élevée de ces mortiers, qui permet la pénétration du gaz carbonique [60].

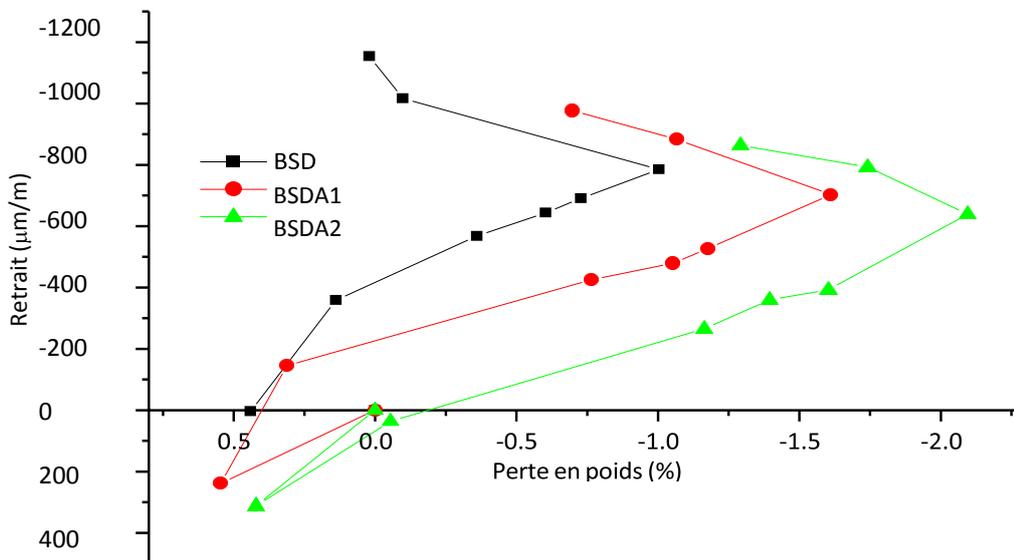


Figure 3.22 : Retrait en fonction de la perte en poids pour les bétons témoins [83].

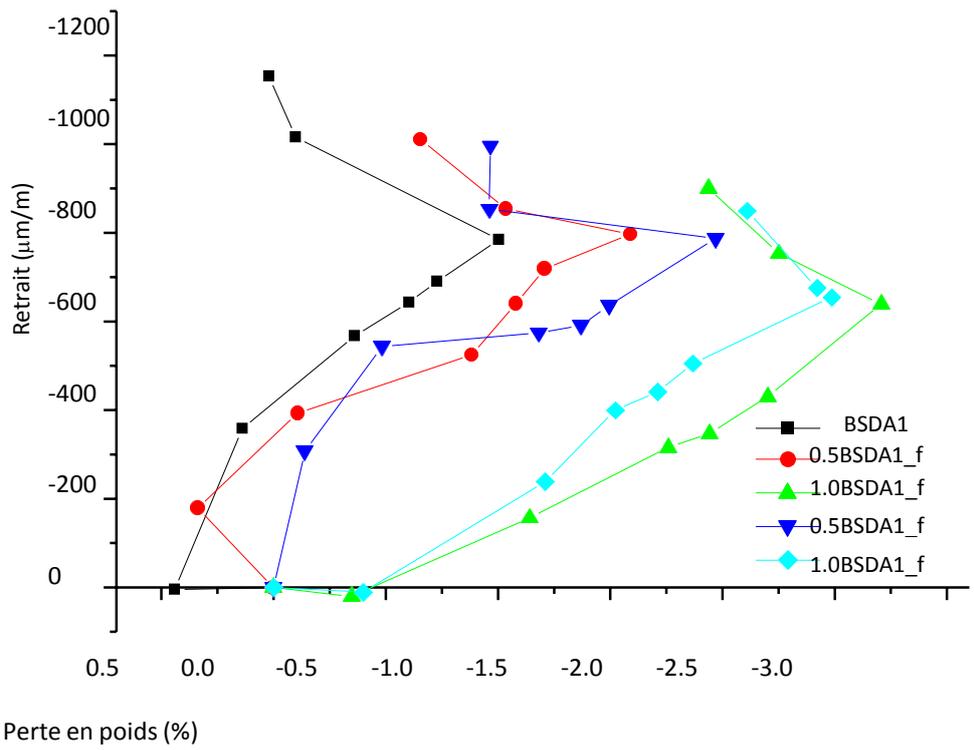


Figure 3.23 : Retrait en fonction de la perte en poids pour les mélanges BSD [83].

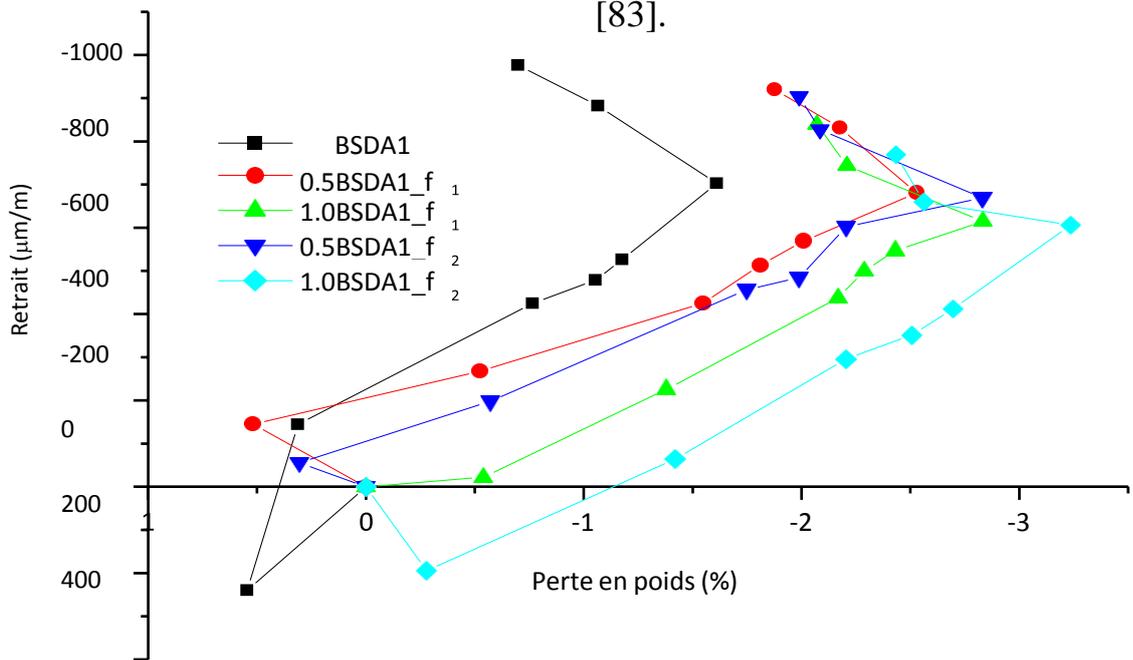


Figure 3.24 : Retrait en fonction de la perte en poids pour les mélanges BSDA1 [83].

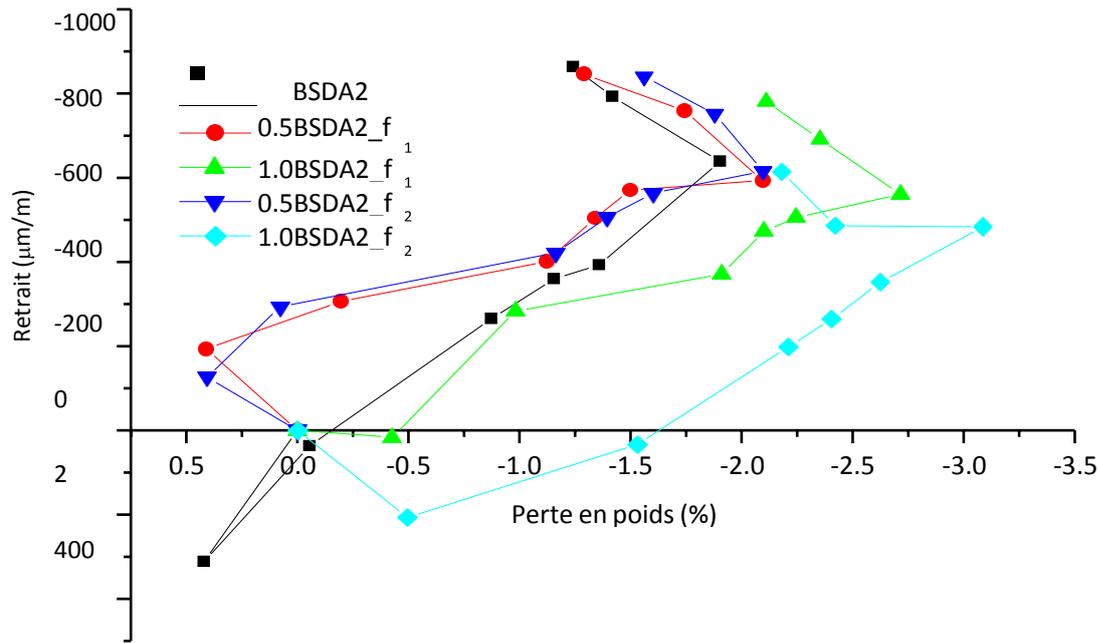


Figure 3.25 : Retrait en fonction de la perte en poids pour les mélanges BSDA2 [83].

Le processus de perte de masse se produit avec l'augmentation de la température. Les fuites d'eau sont la principale cause de la perte de masse du béton avant 600 °C [67]. La perte de masse du béton mesurée en mode permanent doit être distinguée de celle obtenue en régime transitoire des cycles thermiques. La Figure 3.26 présente l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de béton au cours du chauffage [68]. Généralement, ce processus se déroule en trois étapes dont les limites varient selon les auteurs.

-De la température ambiante jusqu'à 100 -150°C : Il y a une diminution de la perte de masse du béton en raison du départ d'eau libre [69, 70].

-Entre 150 et 300°C : Il y a une augmentation rapide de la perte de masse en raison du départ de l'eau principalement liée aux hydrates du gel C-S-H [68, 70]. Le béton perd approximativement 65 à 80 % de la masse d'eau totale, à 300°C [71].

- Au-delà de la température 300°C : une diminution de la perte de masse correspondant à la déshydroxylation de la portlandite (450-550 °C), à la décomposition des silanols (SiOH), du silex (400-570°C) [72] et à la décarbonatation du calcaire CaCO₃ (600-800°C) [73, 74, 75].

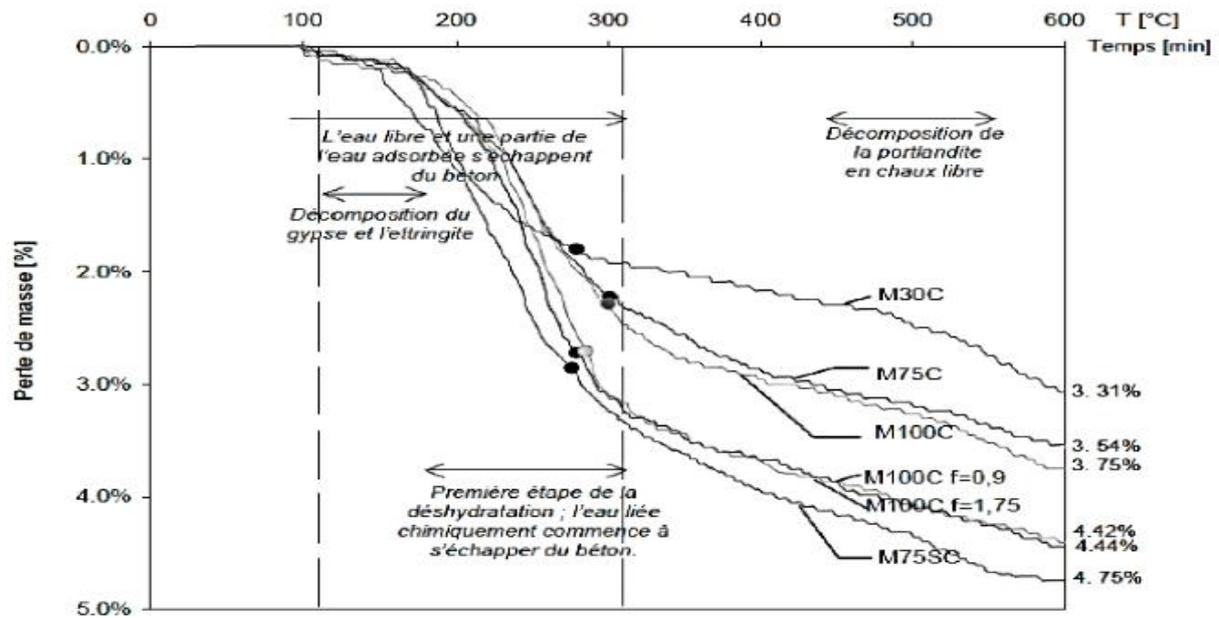


Figure 3.26 : Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenue par séchage à 105°C [68].

Hager (2004), a réalisé des tests de perte de masse sur trois bétons sans fibres et avec différents dosages de fibres de polypropylène ($0,9 \text{ kg/m}^3$ et $1,75 \text{ kg/m}^3$) (Figure 3.26). Lorsqu'il est chauffé à 600°C , la perte de masse du béton sans fibres est de 3,75%. Avec les dosages en fibres de polypropylène de $0,9 \text{ kg/m}^3$ et $1,75 \text{ kg/m}^3$, les pertes de masses de ces bétons sont respectivement de 4,42% et 4,44%.

L'ajout de fibres de polypropylène ne modifie pas l'évolution de la perte de masse en fonction de la température (chauffage [68] et refroidissement [74]). Les trois domaines caractérisant l'évolution de la perte de masse sont également observés.

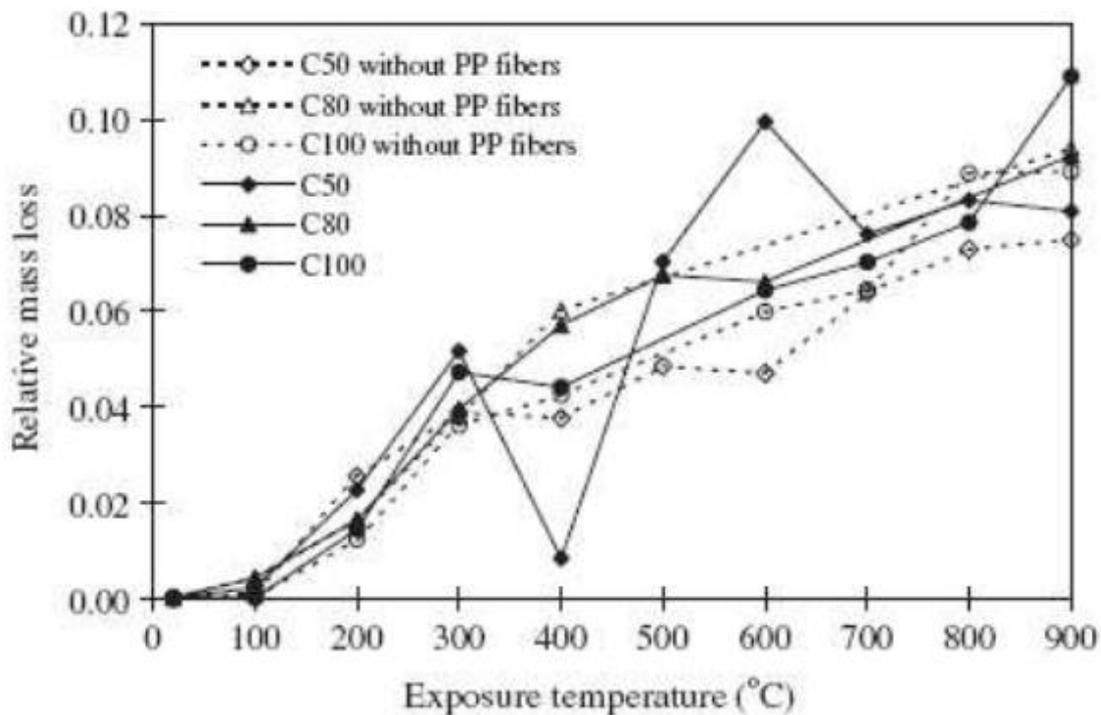


Figure 3.27 : Courbe montrant la Perte de masse de bétons sans et avec 1.8 kg/m³ de fibres de polypropylène à la suite du traitement thermique au feu standard ISO 834 [74].

Il a été observé à travers l'expérience que les bétons de fibres de polypropylène perdent plus de masse que les bétons sans fibres. L'augmentation du taux de perte de masse peut s'expliquer par la fusion des fibres de polypropylène qui crée un canal facilitant le transport de la vapeur. La perte de masse supplémentaire observée était ainsi liée à la fusion et à l'évaporation des fibres de polypropylène dans le béton lors de la montée en température [76].

À travers l'essai qui a été mené par Hager (2004), la perte de masse de l'état d'équilibre a eu lieu pendant le séchage à 105°C, les tests ont été réalisés sur des échantillons de plus de 4 ans pour M30C, M75C, M75SC et pour M100C et environ deux ans pour le béton fibré (Figure 3.27). Les résultats montrent une perte de masse plus grande du béton ordinaire par rapport au béton à haute performances résultat confirmé par Xing [72]. Elle peut s'expliquer par la plus grande perméabilité du béton normal due aux propriétés du réseau poreux de ce béton [68].

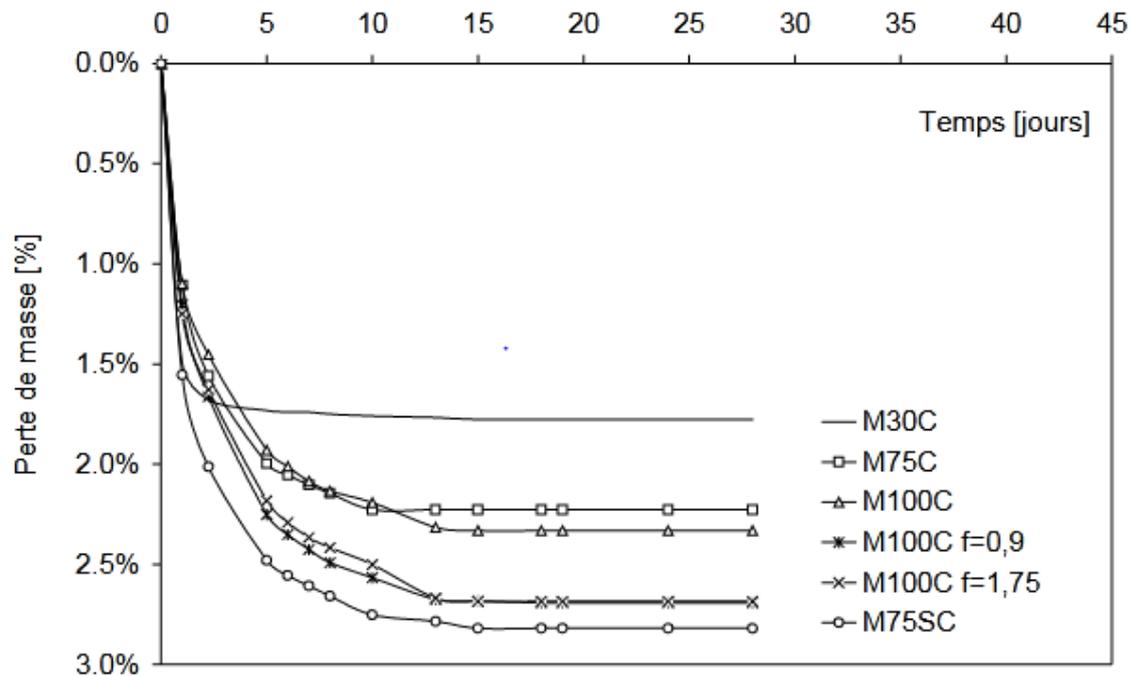


Figure 3.28: Perte de masse des bétons étudiés durant le séchage à 105°C [68].

Béton ordinaire : M30C, béton à haute performance : M75C, M100C, M75SC et deux BHP fibrés : M100C f=0.9 et M100C f=1.75.

Hager a également étudié l'influence de la taille des échantillons sur la perte de masse. Les éprouvettes 104 x 300 mm² et 104 x 60 mm² sont issues du même mélange de béton, et elles sont sollicitées à l'état stationnaire à 105 °C (Figure 3.28). Les résultats montrent que la perte de masse totale des deux échantillons est la même. Cependant, la cinétique de perte de masse des petits échantillons est plus rapide. Toutefois la quantité d'eau libre dans l'éprouvette ne dépend pas de la taille des échantillons, les deux courbes tendent vers la même valeur asymptotique [68].

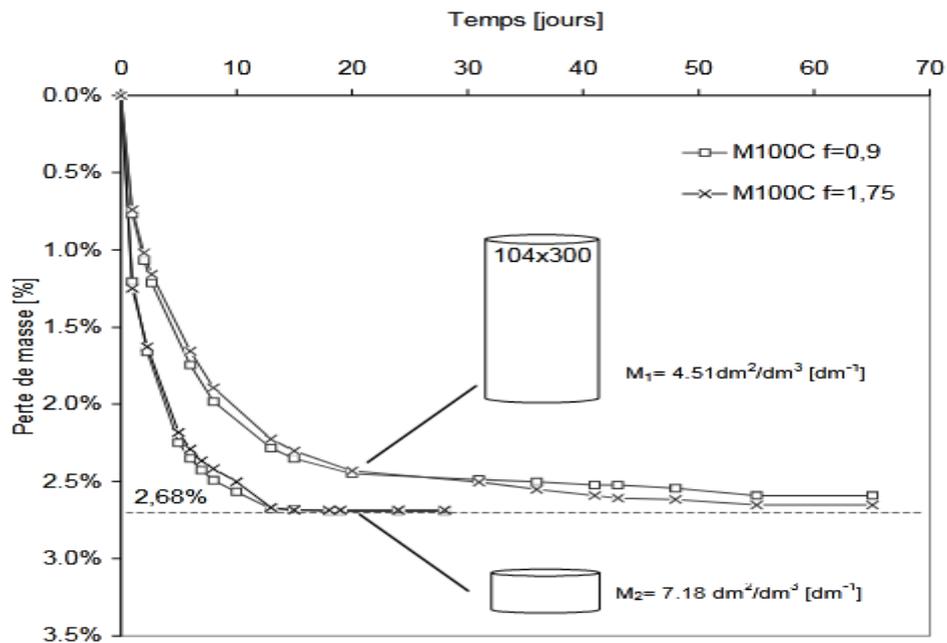


Figure 3.29 : Perte de masse des éprouvettes 104x30 mm² et 104x60 mm² étuvées à 105°C [68].

Pour une matrice donnée (ordinaire ou à hautes performances), le volume de pâte était constant pour les trois types de granulats utilisés dans le béton (calcaire, silice et silice calcaire). La différence de perte de poids entre béton après chauffage est donc uniquement liée à la nature du granulat utilisé [72].

Les résultats de la Figure 3.30 ont montré que la perte de masse des bétons est moins significative pour les bétons de granulats siliceux que pour les bétons de granulats calcaires ou silico-calcaires [72].

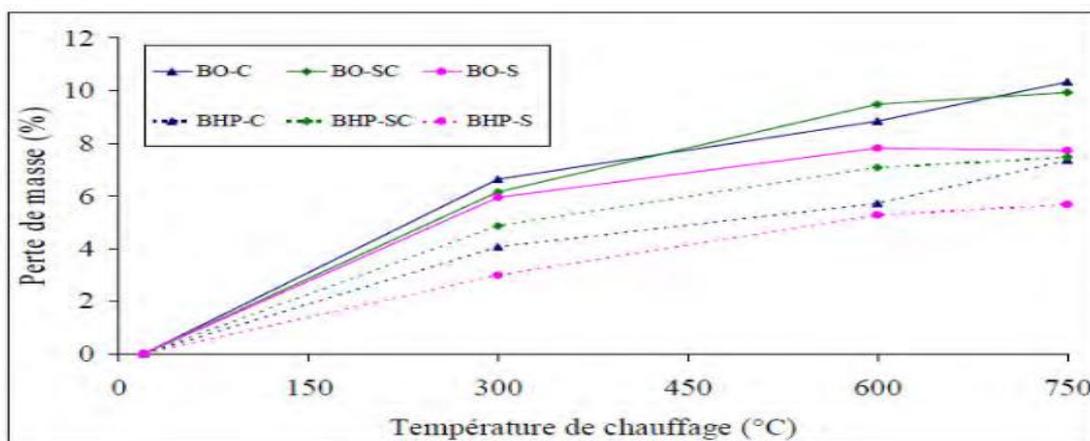


Figure 3.30: Perte de masse des bétons testés en fonction de la température de chauffage : une plus faible perte de masse pour les BHP que les BO [72].

Dans son expérience, l'auteur a étudié l'effet de la vitesse de chauffage sur la perte de masse comme le montre la Figure 3.31. Il a observé que lorsque la vitesse de chauffage était lente, la quantité d'eau évacuée est plus grande à chaque température entre 100 et 300°C [71].

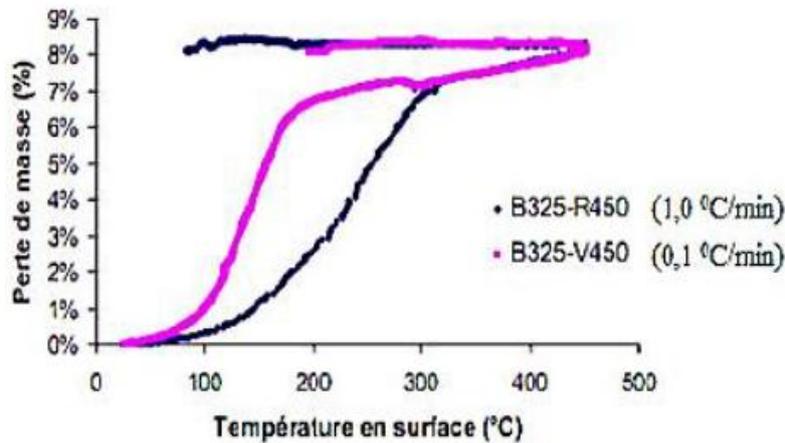


Figure 3.31: Évolution de la perte de masse suivant la vitesse de chauffage [71].

- Effet de la fibre métallique sur l'évolution de la perte de masse :

Les figures 3.32 et 3.33 montrent l'évolution de la perte de masse du béton sans fibres différents par les rapports E/C et le béton de fibres minérales (E/C = 0,35 et 0,45) en fonction de la température [77].

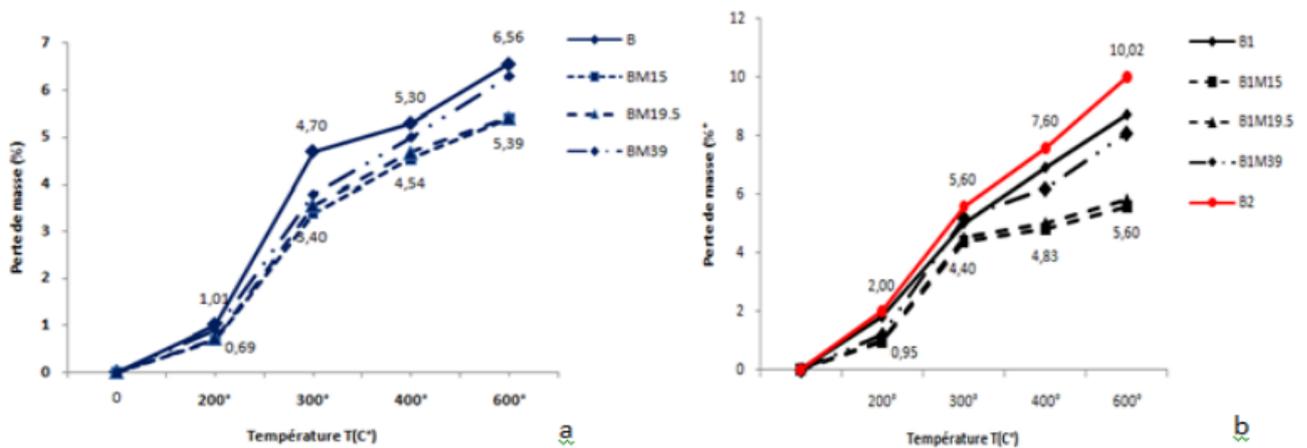


Figure 3.32 : Evolution de la perte de masse en fonction de la température du cycle de chauffage refroidissement pour(a) des bétons à haute performance sans fibres B et avec des fibres métalliques BM15, BM19.5 et BM39(b) le béton sans fibres B1 et B2 et les bétons avec des fibres métalliques, B1M15, B1M19.5 et B1M39 [77].

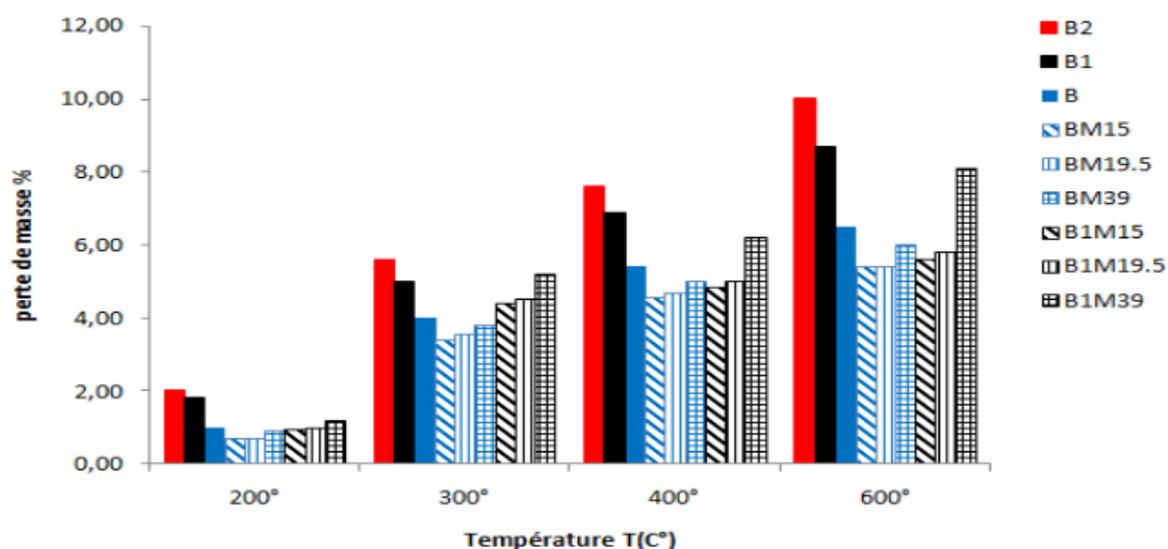


Figure 3.33: Evolution de la perte de masse des bétons sans fibres et avec des fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement [77].

[Rahmani, 2019] conclut que de la courbe de perte de masse est identique pour tous les bétons. Cela ne dépend pas de l'ajout de fibres métalliques ou du rapport E / C. Pour les bétons étudiés, la présence des trois domaines a toujours été observée.

-Il était observé dans une gamme de température qui varie entre 0 et 200°C, que la perte de masse trouvée est essentiellement liée au départ de l'eau libre et absorbée qui se trouve dans le béton. Les valeurs obtenues de perte de masse sont comme suit : 1,01% pour le béton B (E/C=0.35) et 1,8 % pour B1 (E/C=0.45) et 2% pour B2 (E/C=0.65). Le béton ordinaire (B2) avait enregistré une perte de masse plus que le béton à hautes performances (B). Après l'ajout de fibres métalliques, il avait remarqué que la perte de masse a diminué par rapport à celle du béton sans fibres, par exemple, la perte de masse dans le cas de BM39 est de 0,65% seulement alors que le béton B perd 1,01 %.

-Dans un intervalle de température compris entre 200 et 400°C, il avait remarqué une forte augmentation de perte de masse, cette dernière qu'est due au départ de l'eau absorbée et liée à la décomposition des hydrates.

- Pour un degré de chauffage à 600°C, la perte de masse enregistrée est comme suivant : - 6.5 % pour le béton B2 (BO) - 7.7 % pour le béton B1 - 10 % pour le béton B. Tandis que la perte de masse est 5,80% et 5,60%, 8,10% pour les bétons avec des fibres métalliques B1M15, B1M19.5 et B1M39 respectivement.

En général, Rahmani conclut que la perte de masse relative pour les bétons formulés avec un faible rapport E/C est moins importante, parce qu'ils contiennent moins d'eau. En cas contraire, la quantité d'eau perdue est importante si le rapport E/C de la formulation est plus fort, ainsi avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse est donc importante. Cette dernière diminue par rapport à celle du béton sans fibres car une partie des granulats est remplacée par les fibres métalliques qui conduit par la suite à la diminution de la quantité d'eau adsorbée ou libre.

3.3. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons recueilli certains résultats expérimentaux qui ont été obtenus par des chercheurs pour différents types de bétons (avec et sans l'ajout de fibre) concernant la résistance à la compression et la perte de masse.

Les opinions et les points de vue des chercheurs divergent, concernant l'effet des fibres sur le comportement mécanique du béton pour les températures normales et élevées. Par ailleurs, d'autres chercheurs, ont remarqué et surtout dans la plupart des résultats une augmentation de la résistance à la compression par l'ajout de fibres (qui sert à améliorer les propriétés du béton). Les fibres peuvent également avoir deux effets contradictoires (selon la nature de l'essai) autrement dit la résistance diminue.

D'autre part, selon les résultats obtenus, les chercheurs ont noté que l'ajout de fibre contribue à la perte de masse par rapport au béton sans fibres.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre étude est basée sur le rôle ainsi que l'importance du renforcement du béton par l'ajout de fibres. Nous avons découvert les différents types de fibres et certaines de leurs applications et nous nous sommes concentrés par conséquent sur la fabrication de bétons de fibres. C'est la raison pour laquelle nous avons essayé de présenter avec plus de détails cela, afin d'atteindre et répondre à notre objectif principal de recherche.

D'après notre étude nous avons constaté que les types et propriétés des fibres affectent la durabilité et le comportement mécanique du béton. L'efficacité des fibres dépend de leur forme, de leur direction et de leur orientation autour de la fissuration ainsi que de leur dimension. Toutefois, pour un meilleur résultat, il est préférable de l'ajouter au mélange à l'état frais. Le dosage et l'orientation des fibres au hasard au sein de la matrice cimentaire peuvent conduire à un phénomène de chevauchement des fibres qui conduit à une chute de la maniabilité ; une mauvaise compacité et une baisse de la résistance.

Selon les résultats obtenus par les chercheurs, il a été montré que la fibre a un rôle dans l'augmentation de la résistance à la compression du béton par rapport à celui non fibré. Certains ont également constaté que la résistance diminue avec l'augmentation de la dose de fibre.

Les résultats de l'essai de perte de masse après l'ajout de la fibre ont montré que:

- La perte de poids en fonction de l'âge est plus importante par rapport au béton sans fibre.
- Le retrait en fonction de la perte de poids du béton de sable montre que la perte de poids est plus importante par rapport au béton de sable sans fibre.
- La perte de masse est affectée par la température car à mesure que la température augmente, il y a une plus grande perte de masse. Ce phénomène peut s'expliquer par la sortie d'eau par les chemins des fissures dans le béton.

Bibliographie :

- [1] Tout sur le béton, "Constituants du béton", 3 mai, 2019.
- [2] Artisan Béton, " Tout savoir sur la composition du béton", Paris, Ile de France, 2004.
- [3] Guide béton, Tout savoir sur le béton et ses applications, "La composition du béton", 2018.
- [4] Holcim. Be, "Les constituants du béton : L'eau de gâchage", 19 Mars 2019.
- [5] Boudjemaa Y., Djilani S., "Micro-Béton à base de sable mixte (sable de dune et sable concassée) avec poudre de marbre et adjuvant", Master II, Université de M'sila 2018-2019.
- [6] Ahmed F., " Conception D'un Béton Destiné Aux Ouvrages Hydrotechniques", Master II, Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique–Arbaoui Abdellah-, 2015.
- [7] Holcim. Be, "Les constituants du béton : Les adjuvants", 21 Mars 2019.
- [8] Dali Youcef S., "Démarche qualité dans la formulation des bétons par la méthode taguchi ". Master II, Université de Tlemcen 2017.
- [9] Adjoudj M., "Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton". Université Hassiba benbouali de Chlef, Algérie, 2015.
- [10] Guermiti L., "Contribution à l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure a base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques", Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.
- [11] Djelouahi H., " Influence des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton", Master II, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2017.
- [12] Gruewald S., Performance based design of self compacting steel fiber reinforced concrete. 2004, Delft University of Technology: Netherlands. P. 233.
- [13] Dupain R., Lanchon R., "Granulats, Sols, Ciments Et Bétons " Editions Casteilla 75005 Paris, 1995, pp. 122-136.

- [14] Rossi P., "Formulation Et Comportement Mécaniques Des Bétons De Fibres Métalliques", *Annales de L'I.T.B.T.P.*, N°492, Série : Béton, 1991, pp.90-107.
- [15] Edgington J., Hannant D.J., Willams R.I.T., "Steel Fiber Reinforced Concrete ", Londres: Building Res. Est., July 1974, 17p, Current Paper, Cp69/74.
- [16] Jecic D., Zanghelline F., "Mortiers Et Ciments Armés De Fibres ", Etude Bibliographique Annales N°347 Février, pp.75-76,1992.
- [17] Durand G., "Les Bétons A Base De Fibres D'acier" Cerilh Stage26-02-1986 N° 6 P6 Et Annales N°347 Février 1977 pp. 48-49.
- [18] Serna Ros P., " Etude De Contribution Des Fibres Métalliques A L'amélioration Du Comportement Du Béton Au Cisaillement ", Thèse Doct. Ing., E.N.P.C., Paris, 1984, 77 P.
- [19] A.C.I Commitee 544- Ir 82., " State Of The Art Report On Fiber Reinforced Concrete "Concrete International, 1982, Vol. 4, N°5, pp. 9-30.
- [20] Dardare J., " Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés de fibres de polypropylène ", In : fibre reinforced cement and concrete, Rilem Symposium,1975, Edited By A. Neville, Lancaster, Construction Press, 1975, pp. 227-235, Communication 5.2.
- [21] Rossi P., Harrouche N. Mix design and mechanical behaviour of some steel-fibre-reinforced concretes used in reinforced concrete structures. *Mater. Struct.* 1990; 23:256–266.
- [22] Okamura H., Ozawa K. Mix design for self-compacting concrete. *Conc. Library JSCE.* 1995; 25:107–120.
- [23] A.C.I., Committee 506 "State of the art report on fibre reinforced concrete" *Concrete International and Design and Construction*, 1984, vol. 6, N°12, pp. 15-27.
- [24] Naaman A.E., (1985) "Fibre Reinforcement for Concrete," *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 7, No. 3, pp. 21-25.
- [25] Aydin A.C., (2007) "Self compactability of high-volume hybrid fiber reinforced concretes." *Construction and Building Materials* 21, pp.1149–1154.

- [26] Cuypersa H. et all., "Durability of glass fibre reinforced composites experimental methods and results". Composites: Part A, Vol.37, 2006, pp. 207-215.
- [27] Yeol Choi Y., Robert L., Yuan R. Y., "Experimental Relationship Between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength of Gfrc and Pfrc". Cement And Concrete Research. Vol. 35, 2005, pp. 1587-1591.
- [28] Chabbi R., Ferhoune N., Bouabdallah F., "Pathologies, Diagnostic A L'aide De Cnd Et Techniques De Réparation Et Protection Des Ouvrages En Béton Armé: Etat De L'art". Faculté Des Sciences Et Sciences Appliquées, Université Larbi Ben Mhidi, Oum El Bouaghi 2018.
- [29] Sekrane N. Z., "Analyse et simulation du phénomène d'alcali réaction dans les bétons". Thèse de doctorat, Université Djillali Liabas de Sidi Belabbes 2015.
- [30] Kelvya Maria de Vasconcelos Moreira, Paulo Vítor Gomes Oliveira, Ênio Pontes de Deus, Antônio Eduardo Bezerra Cabral, "Alkali-silica reaction: understanding the phenomenon", 2021.
- [31] Holcim B., " Causes et préventions des altérations du béton : Réaction alcali-silice", 2019.
- [32] Ekström T., " Leaching of concrete: the leaching process and its effects". Lund University, 2003.
- [33] Fredrik B., "Effect of Leaching on Compressive Strength of Cement Mortar", Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden 2017.
- [34] Pollet V., Dooms B., Mosselmans G., " Prévention de la corrosion des armatures par carbonatation du béton", 2007.
- [35] Hadjersi F., Benzeouad O., "Caractérisation rhéologique d'un béton auto plaçant (BAP) à base de fumée de silice", Master II, Université Mohamed Boudiaf –Msila, 2018.
- [36] Jiang w., Jiangxiong W., Haoliang H., Jie H., Qijun Y., "Effect of multiple ions on the degradation in concrete subjected to sulfate attack ", 2020.
- [37] Glass G.K., "6.07 - Deterioration of Steel Reinforced Concrete". Comprehensive Structural Integrity. Volume 6, 2003, Pages 321-350.

- [38] Azrar T., "Influence du PH sur les propriétés physico-mécaniques d'un mortier autoplaçant", Master II, Université Akli Mohand Oulhadje-Bouira 2018.
- [39] Djerad K., Chouya. A., "Revue bibliographique sur la durabilité des bétons autoplaçants (BAP) fibrés", Master II, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2020.
- [40] Holcim B., "Causes et préventions des altérations du béton : Action des produits chimiques", 2019.
- [41] Rossi P., Harrouche N., Le Ma F., 1989b. Comportement mécaniques des Bétons de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et précontraint. Annales de L'I.T.B.T.P. série matériaux 479, 167-182.
- [42] Swamy R.N., Managat R.S., 1974. Influence of fiber geometries on the properties of steel fiber reinforced concrete. Cement and concrete research 4, 451-465.
- [43] Murali G., Santhi A. S., Mohan Ganesh G., 2014. Effect of Crimped and Hooked End Steel Fibres on the Impact Resistance of Concrete. Journal of Applied Science and Engineering 17(3), 259-266.
- [44] Müller H.S., Haist M., 2009. Concrete. In: Structural concrete Textbook on behaviour, design and performance, Volume 1, fib Bulletin 51, pp. 95-149.
- [45] Chern J.C., Young C.H., 1989. Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete 11, 205- 214.
- [46] Giaccio G.M., Zerbino R.L., 2005. Mechanical behaviour of thermally damaged high- strength steel fibre reinforced concrete. Materials and Structures 38, 335-342.
- [47] Yang J., YuDan J., HongBin L., Jian C., 2007. Mesomechanism of steel fiber reinforcement and toughening of reactive powder concrete. Science China Technological Sciences 50(6), 815-32.
- [48] Luo X., Sun W., Chan SYN., 2001. Steel fiber reinforced high-performance concrete: a study on the mechanical properties and resistance against impact. Materials and Structures 34, 144-9.

- [49] Köksal F., Altun F., Yigit I., Sahin Y., 2008. Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and Building Materials* 22, 1874-1880.
- [50] Bentalha M., Houari H., 2007. Étude du comportement des matrices cimentaires renforcées de fibres métalliques sous chargement monotone croissant. *Sciences & Technologies* 25, 51-58.
- [51] Hamidi B., Koohdaragh M., 2011. Effect of Application of Microsilis, Steel Fibers and Different Type Bars and Aggregate size on concrete compressive force. *Australian Journal of Basic & Applied Sciences* 5(12), 2600-2605.
- [52] Holschemacher K., Mueller T., Ribakov Y., 2010. Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design* 31, 2604-2615.
- [53] Giaccio G.M., Zerbino R.L., 2005. Mechanical behaviour of thermally damaged high- strength steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures* 38, 335-342.
- [54] Neves R.D., de Almeida J.C.O., 2005. Compressive behavior of steel fiber reinforced concrete. *Structural Concrete* 6 (1), 1-8.
- [55] Ait-Tahar K., 2001. Mode de rupture par flexion des poutres composites en béton defibres. *Annales de l'I.T.B.T.P.* 4, 11-17.
- [56] Absi E., 1994. Bétons de fibres, synthèse des études et recherches réalisées au C.E.B.T.P. *Annales de L'I.T.B.T.P.* 520, 85-127.
- [57] Marar K., Eren Ö., Yitmen İ., 2011. Compression Specific Toughness of Normal Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (NSSFRC) and High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (HSSFRC). *Materials Research* 14(2), 239-247.
- [58] Rossi P., 2009. Fibres métalliques ou fibres synthétiques. *Revue Bétons* 21.
- [59] Hsie M., Chijen T., Song P.S., 2008. Materials Science and Engineering Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Mater Science and Engineering A.* 494, 153-157.
- [60] Mesbah H.A., Buyle-Bodin F., 1999. Efficiency of polypropylene and metallic fibers on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. *Construction and Building Materials* 13, 439-447.

- [61] Beddar M., Belagraa L., 2003. Technical Note Influence of fibrous waste addition on the shrinkage of mortars. *Asian Journal of Civil Engineering* 4, 65-72.
- [62] Pihlajavaara S.E., 1977. Carbonation -An Important Effect on the Surfaces of Cement Based Materials. RILEM/ASTM/CIB Symposium on Evaluation of the Performance of External Vertical Surfaces of Buildings. Paper No. 9, Otaniemi, Espoo, Finland, 9 pp.
- [63] Guerbas N., Attallah O., "Etude de l'effet des températures élevées sur les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant renforcé par des fibres métalliques", Master II, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2017.
- [64] Setti F., Ezziane K., Setti B., "Effet des fibres métalliques sur certaines propriétés mécaniques du béton renforcé de fibres", Université M'Hamed Bougara Boumerdès, 2012.
- [65] Mashrei M. A., Sultan Ali A., Mahdi Alaa M., "Effects of Polypropylene Fibers on Compressive and Flexural Strength of Concrete Material", *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* 9(11), 2018, pp. 2208–2217.
- [66] Liaqat A., Qureshi, Adeel Ahmed, "An Investigation on Strength Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete". University of Engineering & Technology, Taxila, Pakistan. 2013.
- [67] Kalifa P., Chene G., Galle C., " High-temperature behaviour of hpc with polypropylene _bars from spalling to microstructure". *Cement and concrete research*, Vol. 31:1487-1499, 2001.
- [68] Hager I., "Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques", Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Croatie, 2004.
- [69] Malier Y., "Les Bétons à hautes performances: caractérisation, durabilité, applications : compte-rendu des travaux scientifiques du Projet national Voies nouvelles du matériau béton", Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 1992.

[70] Noumowé N.A., "Effet de hautes températures sur le béton (20-600°C), Cas particulier du béton à hautes performances", Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.

[71] Kanéma M., "Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons", Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2007.

[72] Xing Z., "Influence de la nature minéralogique du granulats sur leurs comportement et celui de béton à une température élevée », Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2009.

[73] Xing Z., Beaucour A. L., Hebert R., Noumowe A., Ledesert B., " Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature, Cement and Concrete Research", Vol. 41, pp. 392–402, 2011.

[74] Xiao J., " Falkner H., On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibers at elevated temperatures", Fire Safety Journal, Vol. 41, 2000, pp. 115-121.

[75] Khoury G. A., Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, Magazine of Concrete Research, Vol. 44, pp. 291-309, 1992.

[76] Pliya P., Beaucour A., Noumowé A., "Strength and porosity of concrete incorporating polypropylene and steel fibers subjected to high temperature". Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, F-95000 Cergy-Pontoise, France, 2009.

[77] Rahmani H., "L'influence des types de fibres sur le comportement du béton à haute température". Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider –Biskra, 2019.

[78] Tetsuya K., " The so-called alkali-carbonate reaction (ACR)-its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR", Cement and Concrete Research . 40 (4), (2010), 643–675.

[79] Grattan-Bellew P.E., Mitchell L.D., J Margeson J., " Deng Min, Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR= ASR? ", Cement and Concrete Research. 40 (4), (2010), 556–562.

[80] Alireza J., " The effect of trass and fly ash in minimizing alkali-carbonate reaction in concrete ", Construction and Building Materials 150 (2017) 583–590.

[81] Bouaziz L., Akmoussi O., "Etude du comportement mécanique des bétons fibrés soumis à de hautes températures". Mémoire, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.

[82] Arabi N., Redjel B., "Contribution à L'étude du Comportement Mécanique du Composite Ciment-Verre et Durabilité des Fibres de Verre". Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, 2006.

[83] Belferrag A., Guettala A., "Contribution à l'amélioration des propriétés mécanique et rhéologiques des bétons de sable de dunes". Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.

[84] Dehouse N., Le Jeune A., "Les Mortiers Et Bétons Renforcés De Fibres", Bruxelles, C.S.T.C, *Revue* 1974, N° 2, 15p.