

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

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

N° Ordre :

N° Série :

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT D'ETAT

Par

Abdou Kamel

***Influence des fibres métalliques sur les
variations dimensionnelles et pondérales
d'une matrice cimentaire***

Soutenue le : 2007

RESUME

La présente étude, s'intéresse aux effets du renforcement d'une matrice cimentaire (mortier) par des fibres métalliques. Pour ce faire, il a été apporté en plus de fibres métalliques normalisées commercialisées, des fibres provenant de déchets métalliques industriels. L'étude a au préalable établi une fiche d'identification pour les cinq mélanges utilisés et qui sont, un béton sans fibres servant de béton témoin, un béton renforcé de fibres commercialisées avec deux taux de pourcentage de fibres, un autre béton renforcé de copeaux métalliques de même taux. Les copeaux ayant la forme tubulaire et un élanement moindre. L'étude expérimentale a été menée sur plusieurs corps d'épreuve de caractéristiques géométriques adaptées aux essais effectués, (sur béton frais et durci).

Il semble important de noter que tous les matériaux utilisés sont des matériaux locaux (région de Constantine), y compris les renforts recyclés.

Ainsi, après la caractérisation mécanique du matériau, est examinée le phénomène du retrait. La recherche a considéré plusieurs paramètres: le type de fibres, le pourcentage volumique des fibres, et le mode de conservation des éprouvettes.

Deux méthodes très différentes de renforcement de la matrice (1% et 2%) sont comparées : dans un 1^{er} cas d'étude il s'agit de fibres ondulées bien ancrées par leur forme, dans l'autre des copeaux d'usinage avec un volume unitaire plus faible, ceci dans le but de contribuer à l'assainissement de l'environnement des déchets industriels.

Les résultats montrent que le retrait de la matrice est diminué par la présence des fibres ; de plus celles-ci modifient la cinétique de séchage. Trois modes de conservations sont confrontés aux résultats expérimentaux. Une explication phénoménologique est proposée. Une évidence de couplage entre le retrait et la perte en eau, avec l'essai de la capacité d'absorption a été soulevée. Ainsi l'introduction de fibres dans le mortier se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau.

L'essai de durabilité met en lumière une grande sensibilité du composite aux effets de "mouillage – séchage" par rapport à la matrice cimentaire, qui se traduit par la diminution de résistance à la traction avec l'augmentation des fibres, et particulièrement les fibres industrielles qui tendent à emmagasiner beaucoup plus d'eau.

Ces effets sont quantifiés et corrélés avec les essais statiques par le suivi de l'évolution dans le temps. Ces observations sont susceptibles d'élargir le champ des applications de ces matériaux renforcés par les fibres métalliques.

Mots-clés :

Béton	Fibre métallique	Matrice	Endurance
Retrait	Résistances	Elancement	Essai

ملخص.

إن الخصائص الأكيدة للخرسانة الليفية تجعلها مادة واسعة الاستعمال. للاستجابة إلى متطلبات الصناعة في مجال البناء، تعطي الخرسانية المدعمة بألياف فولاذية مواد جديدة يتطلب تحديد و تقدير سلوكياتها الميكانيكية و ديمومتها.

إن التنبؤ بتأثير تواجد الألياف في القالب، بدت بسرعة مشكلا معقدا، فالنظريات التقليدية للمواد المركبة لا تعطي إلا إجابات جزئية، لأنه إلى جانب الوجه التركيبي البحت للمادة، هناك إتلاف و تمركز للشقوق قبل الانهيار الكلي.

في هذه الدراسة نقدم تقديرا للأداءات الجيدة في المدى المتوسط و البعيد لمختلف أنواع الأمزجة. نوعان من الألياف تستعمل كتركيب أساسي لكل البلاطات، أحدهما أنتج صناعيا، في حين أن الآخر، ما هو إلا تثمين لمنتج ثانوي: بقايا فولاذية من التصنيع، و من هنا ظهرت طريقتان مختلفتان للتدعيم. هدف هذا البحث:

- توفير معلومات عن خصائص التحولات البعدية و الوزنية للقوالب المدعومة بألياف فولاذية.
- تثمين المنتجات الثانوية

إننا نضع علاقة بين فقدان الوزن و الانكماش (التقلص).

نلاحظ بان فقدان الوزن أكبر في حالة القوالب المدعومة بألياف منها في حالة الشواهد. ان الألياف يمكنها إحداث مسارات تفضيلية لانطلاق الماء.

نلاحظ أن الألياف تنقص قليلا من الانكماش في حين أن هناك اختلاف ضئيل بين النوعين من الألياف. و بعد فترة طويلة يكون تأثير الألياف واضحا لأن القوالب المدعومة بألياف أسرع استقرار من القوالب التي لا تحوي أليافا.

إن نتائجنا تؤكد النتائج المتحصل عليها في دراسات أخرى سابقة:

إن شكل و كمية الألياف، تبدو العوامل الأكثر تحكما في الانكماش.

Introduction générale : Présentation de la problématique de recherche

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

L'endommagement est un des mécanismes principaux qui traduit la simple fissure jusqu'à la ruine de l'ouvrage. Il affecte l'intégrité du matériau observable par une modification du fonctionnement de la structure. Le niveau d'endommagement dépend des efforts reçus par rapport à la résistance potentielle du matériau et évolue différemment selon la géométrie de l'ouvrage. Les structures de type poutre ou les éléments de massifs de béton, par exemple, paraissent plus affectés par pathologies de fissuration. Les ouvrages élancés, tels que les poteaux, ou encore les coques, sont plus spécifiquement sensibles aux ruptures par instabilité [2].

A ce mécanisme, s'ajoutent les effets différés, principalement, le fluage et le retrait. Le premier crée une progression des déplacements sous charge maintenue constante au cours du temps.

Le retrait quant à lui se traduit par une variation volumique du béton (contraction) durant les phases de mûrissement et de séchage du matériau. Sa découverte au début du siècle ne fut pas glorieuse puisque les déformations du retrait apparaissent comme des mécanismes négatifs vis-à-vis du comportement des structures (déplacements plus importants, modification du mode de fonctionnement..). A l'heure actuelle, les déformations de retrait constituent une source de pathologies structurelles touchant directement l'intégrité du béton à maturité, notamment par une fissuration diffuse et croissante au sein du matériau [33].

Depuis l'avènement du béton, les comportements ont été étudiés en fonction de la composition du béton, de la résistance, de l'âge du matériau ou encore, de l'effet de mode de conservation. Puis l'étude de la microstructure et des interactions entre chaque phase

Influence des Fibres Métalliques sur les variations dimensionnelles et pondérales d'une Matrice Cimentaire

CHAPITRE I

LE RENFORT FIBREUX

NOTES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I

*

Le renfort fibreux

Notes bibliographiques

Si de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des bétons avec une armature ordinaire est bien connue, il est loin d'en être de même vis-à-vis des BRF. Ces derniers sont de conception récente et leur emploi dans la réalisation de constructions reste encore limité.

Et cependant, on ne peut envisager de construire en BRF, qu'à la condition de pouvoir connaître les mécanismes de détail du fonctionnement de la liaison et de la dégradation sous charges et actions diverses. Qu'au préalable nous avons recueilli les éléments essentiels de connaissance sur l'élaboration et les propriétés des ces BRF.

Dans le premier paragraphe de ce chapitre, nous avons précisé à partir d'une synthèse bibliographique ce qu'est un BRF en indiquant ses caractéristiques physiques, chimiques mécaniques tirées de la littératures existante.

Dans la seconde partie, la composition du composite doit répondre à des exigences de compacité et de fluidité. Le dosage des différents constituants est choisi en fonction de l'usage de ce genre de matériau et principalement de ses propriétés rhéologiques obtenues.

1. Introduction

Bien qu'étant un des matériaux de construction les plus utilisés de nos jours, le béton possède néanmoins une propriété très nocive, pour la sécurité des structures (sa fissurabilité). Pour tenter de remédier à cet aspect négatif, on a imaginé plusieurs procédés dont celui d'armer le béton par l'intermédiaire de barre d'acier, (Béton armé classique).

Un autre procédé consiste à éviter de faire travailler le béton en traction grâce à une compression préalable : c'est le béton précontraint.

A l'inverse du rôle des armatures passives et de précontraintes, Il existe actuellement une grande variété de matériaux composites. La plupart sont destinés à des industries de pointe. Celles-ci utilisent des composites constitués de fibres de carbone, d'alumine, de wiskers etc... dans des matrices qui sont d'origine organique ou métallique [1].

Cependant, nous rencontrons aujourd'hui plus spécialement dans le bâtiment et travaux publics, un produit dont les constituants, le mode de fabrication, les propriétés et le comportement correspondant à ceux des matériaux composites. Il s'agit du béton de fibres composé d'une matrice cimentaire et des fibres apportant une armature à celle-ci.

Le béton de fibres est un matériau composite certes (mélange de ciment, granulats, eau, et fibres), mais qui doit être considéré comme homogène (fibres correctement réparties avec orientation aléatoire), comme peut l'être un béton classique, à la différence du béton armé traditionnel dans lequel le positionnement des armatures est défini en fonction des efforts appliqués.

Il ne s'agit donc pas d'un béton armé dans lequel on aurait remplacé l'armature traditionnelle en acier (treillis soudés et barres) par des fibres; de ce fait le béton de fibres ne doit pas être abordé à partir « d'équivalence » avec le béton armé tel qu'on le connaît actuellement.

Il s'agit d'un produit nouveau présentant notamment une résistance à la traction encore faible par rapport à la résistance à la compression, mais toutefois mobilisable dans des conditions normales de sécurité, pour lequel il est nécessaire de :

- Définir des prescriptions de fabrication et de mise en oeuvre pour qu'il y ait effectivement « béton de fibres ».

- Etudier les lois de comportement de façon à préciser ses domaines spécifiques d'utilisation et définir des critères de dimensionnement.

- L'incorporation des fibres diverses dans le matériau fragile qu'est le béton a fait et continue de faire l'objet de nombreuses recherches; plusieurs applications ont également vu le jour.

L'étude bibliographique présentée apporte dans une première partie des informations générales sur le comportement mécanique des bétons renforcés de fibres. Dans une seconde partie, elle résume les travaux qui se intéressées au comportement du bétons de fibres.

Remarque :

Le béton de fibres est un matériau composite (matrice cimentaire, granulats, fibres et vides). Il peut être considéré comme matériau composite homogène (renfort réparti dans le milieu orienté ou non), comme peut l'être un béton classique, mais différemment du béton armé traditionnel dans lequel le positionnement des armatures répond à la stricte nécessité de reprendre des efforts de traction, de cisaillement.

Il ne s'agit donc pas d'un béton armé dans lequel on aurait remplacé l'armature traditionnelle en acier (barres et treillis soudés) par des fibres ; de ce fait le béton de fibres ne doit pas être abordé à partir " d'équivalence " avec le béton armé tel qu'on le connaît actuellement. Il s'agit d'un produit nouveau. Pour illustrer ce propos, la figure 1.1 montre une surface de surface de rupture d'un béton renforcé de fibres métalliques, qui permet de donner une perception visuelle du renforcement.

Des recherches systématiques ont été menées depuis 1960 pour comprendre le comportement sous diverses sollicitations du béton renforcé par des fibres. Ce dernier a fait l'objet d'un intérêt particulier de la part de nombreux chercheurs qui ont publié divers articles et rapports sur le sujet [2],[3].

En 1975, lors de la conférence internationale de RILEM, les nombreux rapports expérimentaux ont permis de vulgariser le sujet, ce qui a permis de collecter d'énormes informations sur les propriétés des matériaux composites et leurs applications.

1.1 Généralités sur les matériaux renforcés par les fibres

Un matériaux composite est un solide polyphasé dans lequel deux ou plusieurs constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne permettent pas d'atteindre.

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

- la matrice constituée d'une phase continue
- les fibres de renfort qui constituent une phase dispersée
- les zones de transition (interfaces) fibres-matrice.

La diversité des composites est essentiellement due à la variabilité du renfort fibreux figure 1.1 et figure 1.2.

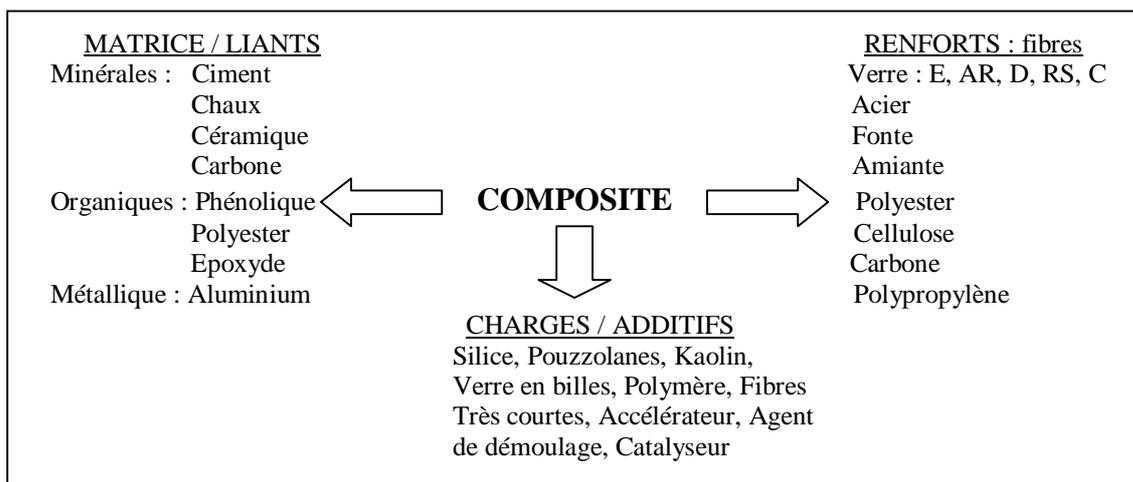


Fig : 1.1 Composition générale d'un matériau composite



Fig : 1.2 Surface de rupture d'un béton renforcé de fibres métalliques

1.1.1 Principe de renforcement.

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

Le mécanisme de renforcement du béton par des fibres consiste à répartir régulièrement des fibres assez courtes dans le matricule béton. Ce réseau de fibres va s'opposer, et ce d'autant qu'il est plus dense, à l'élargissement de la fissure ; la ou les premières fibres rencontrées effectuent une couture de la fissure jusqu'à bloquer l'évolution ; si les efforts excessifs persistent, d'autres fissures vont se former, qui seront à leur tour cousues par d'autres fibres.

Le renforcement par les fibres du béton permet donc de freiner la propagation incontrôlée des fissures, ce qui permet à celui-ci d'acquérir qualités (ténacité, résilience) ou d'améliorer certaines caractéristiques.

1.2 Les différents renforts : les fibres

Celles-ci diffèrent par leur nature mais aussi par leur forme de présentation.

Il existe:

- des ensembles linéaires (fils, mèches).
- des ensembles surfaciques (tissus souples, mat).
- des ensembles multidirectionnels (tresses, tissus complexe)

Dont les qualités recherchées sont les suivantes :

- bonnes caractéristiques mécaniques
- résistance thermique

Le tableau 1.1 présente différents renforts. Il met en évidence la nature très variée des produits proposés. Deux types de fibres peuvent être distingués: l'un composé de fibres courtes dispersées, l'autre de fibres continues.

Les comportements mécaniques de ces deux types de fibres sont totalement différents [4].

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces massives, renforcement de pâte pure de matériau de béton, réparation de structures ...), de leurs propriétés (résistance et module plus ou moins élevés, adhérence plus ou moins bonne...) de leur disponibilité et de leur prix.

1.2.1 Les fibres d'amiante.

Les fibres d'amiante sont des silicates hydratés magnésium extrait de roches appartenant aux familles des serpentines et des amphiboles [5].

Selon [6], les fibres d'amiante ne conviennent pas pour armer des mortiers et des bétons car elles sont trop courtes, et elles nécessitent beaucoup d'eau de gâchage. En revanche elles conviennent parfaitement comme charge avec la pâte pure, avec ou sans ajout de poudre de silice. Ce matériau offre une résistance à la traction de 15 à 25 MPa et en flexion de 27 à 40 MPa

1.2.2 Les fibres de verres.

Le tableau 1.1 montre, qu'il y a trois types de fibres de verre (VENUAT. 1975).

Composition Fibre de verre	AL ₂ O ₃	Si O ₂	ZrO ₂	C ₂ O	M 90	N ₂ O	B ₂ O ₃
Verre classique	73	1	0	8	4	13	10
Verres borosilicate	55	14	0	17	5	0	8
Verres Zirconium	70	0,2	16	0	0	12	8

Parmi les trois types de fibres de verre seules la fibre de zirconium a une bonne résistance aux alcalins et peut être utilisée dont la composition à base de liants hydrauliques. Les autres fibres nécessitent un traitement par des résines.

1.2.3 Les fibres de polypropylène.

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 pour l'industrie textile [6]. Les caractéristiques principales de ces fils de polypropylène sont les suivantes :

- Résistance à la traction 400 à 8000 MPa
- Module d'élasticité : 4000 à 8000 MPa
- Masse volumique : 0,9 Kg/dm³
- Coefficient de dilatation thermique : 90 M/m⁰c

1.2.4 Les fibres métalliques.

a- Les Fibres d'acier

Les fibres d'acier sont sans doute les plus utilisées. Elles ont fait l'objet de plusieurs recherches. A l'origine, les fibres rectilignes et de section circulaire (d'un type identique à celles servant à armer les pneumatiques) ont évolués vers les fibres d'acier en tôle cisailée.

Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les uns des autres par leurs diamètres, leur section (ronde, carrée, rectangulaire ...), leur longueur et leur mode d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes ondulées ou présenter des élargissements aux extrémités, soit des coudes ou des crochets pour améliorer l'adhérence.

b- Rubans Métalliques Amorphes:

Le centre de recherche pont à MOUSSON (France) développe des alliages amorphes de composition $(Fe, Cr)_{80} (P,C,Si)_{20}$ élaborés à partir de fonte, de terrophosphore et de ferrochrome dont les propriétés les plus intéressantes sont la résistance à la corrosion et les propriétés magnétiques associées à des bonnes résistances mécaniques.

La fabrication:

Le métal fondu est versé dans le creuset maintenu à température par un inducteur. Le creuset est muni d'un orifice par lequel coule un jet de métal.

La trempe d'un jet de métal fondu sur une roue tournant à grande vitesse (30 à 50 m/s) est le procédé le plus couramment utilisé pour fabriquer des verres métalliques suivant la taille de la buse d'éjection, la longueur du ruban obtenu varie de 1 à 150 mm.

1.3 Avantages et inconvénients des B.R.F

Les améliorations suivantes des propriétés des bétons de fibres sont considérées comme acquises.

- * Résistance à l'impact plus élevée.
- * Augmentation de l'énergie de rupture.
- * Amélioration de la ductilité.
- * Comportement différent à la fissuration.
- * Entraînant un retard notable de la fissuration.

Mais il a été remarqué certains inconvénients dus à l'utilisation de fibres:

* Réduction de la maniabilité du fait de la présence des fibres quand le pourcentage de celles-ci est élevé.

* Introduction d'un certain type de fibres dans le béton avec les moyens traditionnels se révèle très difficile.

* Pendant la livraison, les fibres sont enchevêtrées, d'où la formation d'oursins lors du malaxage implique la difficulté de mise en place.

* Actuellement le prix des fibres est relativement très élevé et de ce fait le prix de revient du m^3 de béton de fibre peut paraître excessif par rapport à celui du béton traditionnel.

1.4 Caractéristiques des renforts fibreux.

Les renforts fibreux sont caractérisés par leur forme et leur nature dont dépendent les grandeurs suivantes : coefficient de dilatation mécanique souple, élasticité, déformation à la rupture, adhésion plus ou moins importante à la pâte de ciment, et neutralité vis à vis du milieu. Le tableau 1-3 donne les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées.

Tab. 1.2 Caractéristiques des fibres les plus utilisées

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse volumique (kg/cm ³)	Résistance traction (MPa)	Module E (MPa)	Allongement (%)	Coefficient de dilatation 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	R au feu (°C)
Amiante (Chrysotile)	0.002 à 0.002	3-20	2.4 à 3	300 à 1000	80 000 à 150 000	2 à 3		1500
Polypropylène	0.01 à 0.1	25 à 75	0.9	400 à 600	4000 à 8000	15 à 20	90	150
Verre (ou zirconium)	0.006 à 0.020	40 à 70	2.6	1500 à 3000	60 000	2 à 3	9	400
Acier	0.2 à 0.3	20-50	7.9	1000 à 3000	200 000	3 à 4	11	1500
Carbone	0.005 à 0.01	variable	2	2000	400 000	0.5	1	400 à 1500
Fonte amorphe	30 ou 40 x 0.03 x 1	30-60	7.2	2500	130 000	2		300
Aramidé	0.012	10	1.4	2800	80 000	4.2	-2	300

Pour compléter ce tableau, et positionner les fibres les unes par rapport aux autres en mettant en évidence leur caractéristique fragile ou ductile, la figure : 1.3 présente les relations contraintes-déformation des fibres.

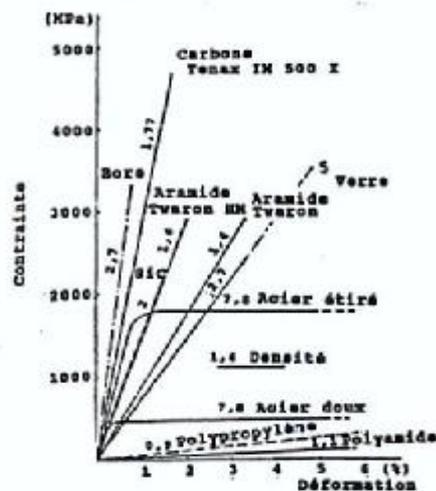


Fig : 1.3 Relations contraintes déformation des fibres de renforcement

1.5 Les propriétés mécaniques des fibres influencent – elles celles du composite ?

* Les caractéristiques mécaniques des fibres, module d'élasticité et allongement à la rupture, sont très différentes d'une fibre à l'autre (tab.1.2). Ces seules caractéristiques permettent-elles de prévoir le comportement du matériau ?

* Le module d'élasticité de la matrice n'est guère modifié à l'origine, la simple application de la loi des mélanges permet d'expliquer ce résultat [7].

* La résistance à l'initiation des fissures du béton de fibres n'est pas seulement un indice pour exprimer quantitativement les caractéristiques du béton à la fissuration, mais également importante qui peut servir de critère pour le calcul d'une structure. Cette valeur difficile à définir précisément est influencée par plusieurs facteurs:

- Le mode de conservation des éprouvettes [8]
- Le pourcentage volumique des fibres [9]
- Le module d'élasticité des fibres [10]
- L'élanement des fibres[11]

1.5.1 Les facteurs influant sur la rhéologie du béton de fibres.

Les paramètres agissant sur l'ouvrabilité sont nombreux. Parmi les principaux on peut citer :

- La taille des granulats.
- Les caractéristiques géométriques de la fibre.
- Le pourcentage volumique des fibres.
- La granularité du squelette et son étendue.

1.5.1.1 La longueur des fibres.

Pour que les fibres puissent être considérées comme armature de renfort homogène, il faut qu'au sein du matériau et à l'échelle de ses composants, elles bloquent le développement prématuré de fissures intra granulaires; aussi il faut donc que la longueur de la fibre soit supérieure à la dimension du gros granulat (trois fois celle du granulat).

Les fibres courtes seraient contournées, voire elles mêmes source de rupture si la liaison fibre était de mauvaise qualité.



Fig : 1.4 Schéma de disposition des fibres

1.5.1.2 Rôle de la teneur en fibres.

Toutes les études aboutissent à une conclusion: la diminution très nette de la maniabilité, lorsque la quantité de fibres dans un mélange augmente, la composition de la matrice est conservée.

La figure (1.5.a) tirée de l'étude de [12] donne la variation de l'affaissement du cône d'Abrams en fonction de la teneur en fibres de polypropylène et d'acier.

Les travaux de[13] illustre à travers la figure (1.5.b) l'effet de la teneur des fibres et de l'élançement sur l'ouvrabilité du béton pour des composés de fibres de verre enrobées de thermoplastique.

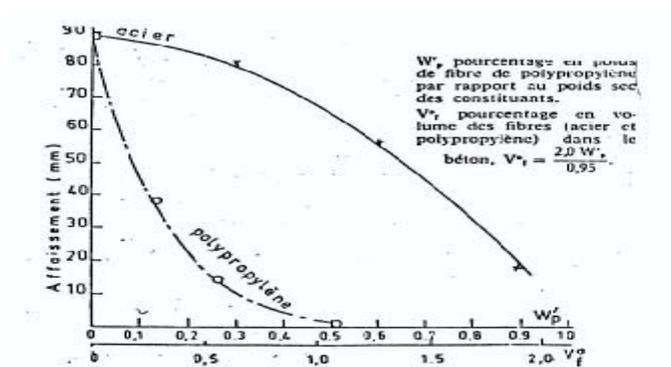


Fig : 1.5.a Effet des fibres incorporées dans un béton sur son affaissement

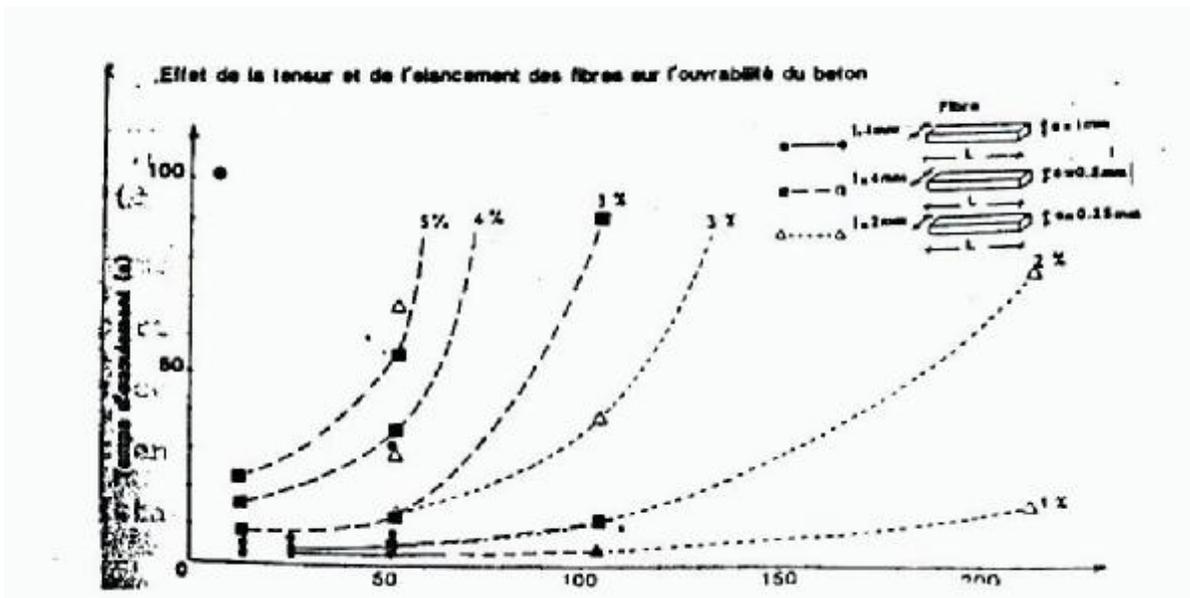


Fig : 1.5.b Ouvrabilité des mélanges en fonction du pourcentage de fibres et de l'élongation.

1.5.1.3 Rôle de l'élongation de la fibre (l/d).

Elle est représentée par la longueur de la fibre sur son diamètre, pour les fibres cylindriques.

L'élongation joue un rôle important sur les propriétés rhéologiques des mélanges, ainsi que sur le coefficient d'espacement des fibres.

Dans le cas des rubans, [14] proposent une valeur équivalente pour caractériser l'élongation.

$$T_i = \frac{(b+e) \cdot l}{b \cdot e}$$

b = largeur de la fibre

l = longueur de la fibre

Si l'épaisseur (**e**) est faible devant la longueur cette formule se simplifie.

$$T_i = \frac{l}{e}$$

Ce paramètre élancement des fibres peut aussi s'exprimer en fonction de la surface spécifique des fibres, de leur volume, de la longueur et d'un coefficient K.

$$T = \frac{\text{Surface développée des fibres}}{\text{Volume des fibres}} \cdot K \cdot \text{Longueur}$$

Précisons que si K est presque égal à 1 pour les fibres cylindriques les plus courantes, alors K = 0,5 pour les rubans minces.

Une diminution de l'ouvrabilité est également constatée avec l'augmentation de l'élancement l/d de la fibre incorporée : les travaux de [15] [16] précisent l'influence de ces paramètres

Les figures (1.6) illustrent la diminution de la maniabilité en fonction de deux paramètres principaux l/d relative de la fibre et de la teneur en fibre V_f .

Pour que les fibres travaillent correctement dans la matrice durcie, il faut nécessairement augmenter l'adhérence. Pour cela les fabricants ont étudié des formes particulières favorisant l'adhérence - ancrage dans la matrice, mais qui agissent aussi sur la rhéologie.

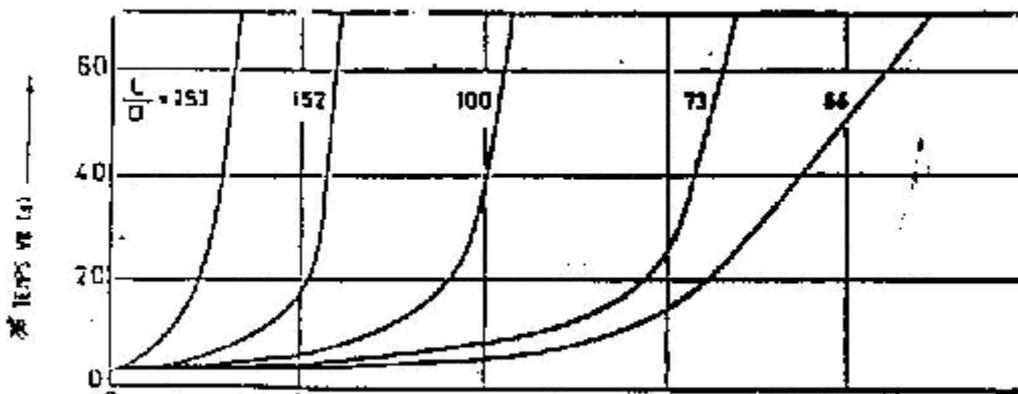


Fig : 1.6 Ouvrabilité en fonction de r et du rapport l/d

Il faut toutefois faire remarquer que pour les fibres en verre considérées comme des fibres souples, l'élancement perd la signification géométrique précise qu'il a pour les fibres d'acier généralement on emploie comme paramètre, lorsqu'il s'agit des fibres de verre, tout simplement la longueur.

1.5.1.4 Influence de la matrice.

Le problème est plus complexe quand les fibres sont introduites dans la matrice de béton car elles sont séparées non par un grain fin, qui peut loger facilement entre elles mais par des particules qui peuvent souvent être de plus grandes dimension que l'espace moyen entre les fibres si ces dernières sont uniformément distribuées.

Pour cela il faut prendre en considération l'interaction entre les fibres et les plus gros granulats, car l'effet devient indésirable quand le volume et la dimension du plus gros granulat augmentent.

Une forte réduction se produit lorsqu'on augmente les grains (teneur). La granulométrie d'un béton ordinaire n'est pas utilisable dans le béton renforcé de fibres.

La figure (1.7) : tirée de l'article de [17] donne la teneur maximale possible de la fibre sans qu'il y ait formation d'oursins en fonction de la proportion du gros granulats ($D_{max} = 10$ mm).

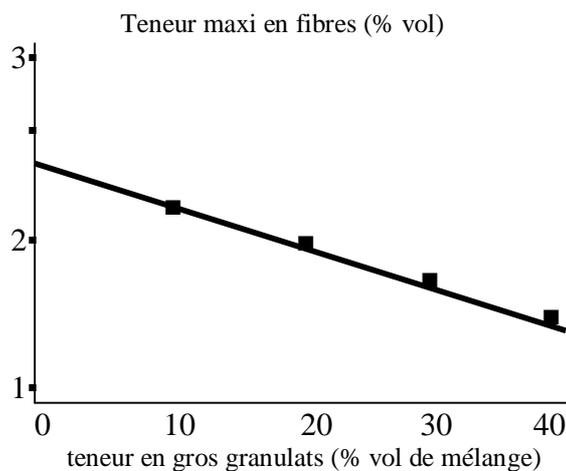


Fig : 1.7 Teneur maximale en fibre en fonction de la teneur en gros granulats

Les travaux de [18] proposent la règle suivante laquelle la teneur en gravillons (G) ne doit pas dépasser la quantité totale des granulats.

$$G / (G+S) < 0,5$$

G: gravillon

S: Sable

Les teneurs en ciment sont ordinairement plus élevées pour les bétons renforcés de fibres que pour les bétons classiques. Elles varient de 325 à 450 Kg/m³ pour une granulométrie de 0 à 10 mm [19]. Afin d'améliorer l'ouvrabilité et réduire la teneur en eau, les cendres volantes peuvent être utilisées en remplacement d'une partie du ciment portland, par exemple 50 à 100 Kg/m³ du ciment

Les adjuvants réducteurs d'eau ont aussi des effets retardateurs de prise et habituellement facilitent la manipulation du B.R.F sur le chantier [19]. Les rapports E/C utilisés dans le B.R.F doivent faire l'objet d'une attention particulière

1.5.1.5 Le rôle du paramètre : $V_f \times l/d$

Le produit de l'élanement par le pourcentage volumique ne peut dépasser une certaine limite située au dessous de 3 pour les mortiers et les micros bétons. Lorsqu'on veut augmenter la qualité de fibres, on doit diminuer leur longueur, condition néfaste pour le composite puisque c'est par la longueur que les fibres apportent l'effet d'armature.

Si le rapport $V_f \cdot l/d$ dépasse la limite, il se forme lors du malaxage des « oursins ». [16] proposent à cet effet une relation générale de la qualité critique de fibres.

$$(100 w_f/w_m) \text{ critique} = 75 \frac{G_m}{G_f} \cdot \frac{l}{d} \cdot k$$

Où : $k = G_m / (G_m + G_f)$

G_m et G_f poids volumique de la fibre et de la matrice

G_m : poids relatif de la matrice moins le poids des grains inférieurs à 5 mm

G_f : poids des grains supérieur à 5 mm

1.5.2 Mise en œuvre du béton de fibres

Les propriétés des composants sont fonctions des propriétés élémentaires de chaque composant et des méthodes de mise en oeuvre (fig.1.8) lors du coulage, de la projection ou de la vibration. Une orientation préférentielle des fibres induit une anisotropie souvent bénéfique, renforcée pour des ouvrages minces par les effets de paroi.

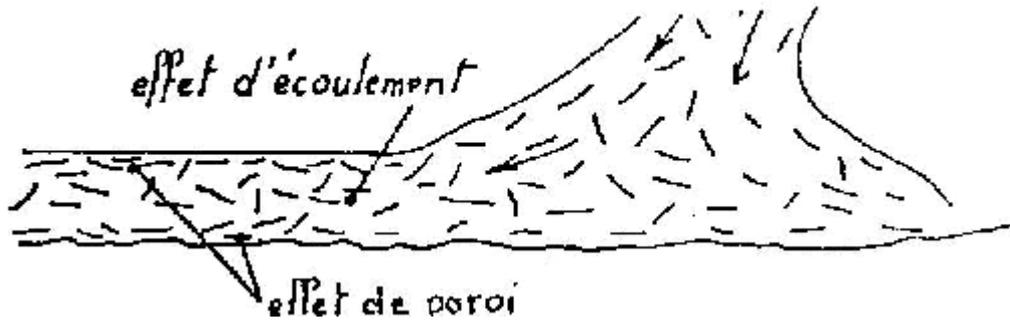


Fig : 1.8 Effet d'écoulement

1.5.2.1 Mise en oeuvre directe par coulage

La quasi totalité des dallages est effectuée dans ces conditions; l'orientation des fibres est conditionnée par l'écoulement du matériau lors de la mise en oeuvre, est simplifiée par l'épaisseur relativement faible de la plaque par rapport à la longueur des fibres utilisées (fig 1.9).

Les travaux [20] ont constaté que les fibres sont principalement orientées perpendiculairement à la direction du coulage lors de la réalisation des éprouvettes vibrées sur table.

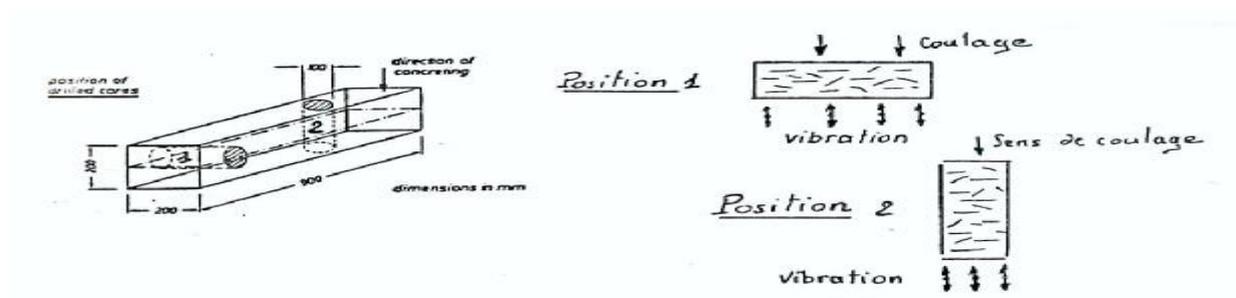


Fig : 1.9 Orientation des fibres lors du coulage

1.5.2.2 Mise en oeuvre par projection

Il existe deux techniques de mise en oeuvre:

- * La voie humide (dite prémix) où les matériaux sont mélangés avant d'être pompés et projetés par l'air comprimé.

- * La voie sèche ou l'on projette séparément les matériaux secs (granulats, fibres; ciment) et l'eau

D'après [21], la voie sèche permette d'obtenir un revêtement de meilleure qualité (béton de fibres étant beaucoup plus sec). La technique par voie humide malgré ses contraintes de nettoyage, semble souvent être préférée afin d'offrir des conditions de travail acceptable.

1.5.2.3 Mise en place par centrifugation

Cette méthode de mise en oeuvre à été étudiée par [22].

Dans cette technique le composite est valorisé grâce à une meilleur structure, due à l'orientation circonférentielle d'une partie des fibres d'acier et à leur adhérence plus grande à la matrice.

Il existe bien évidemment d'autres tels que le coulage par pultrusion ou continu, etc....

1.6 PARAMETRES DE BASE DES DIFFERENTES APPROCHES

THEORIQUES PROPOSEES : LOI DE COMPORTEMENT

De nombreux chercheurs ont mis l'accent sur des paramètres physiques, considérés comme facteurs déterminants dans le comportement mécanique des bétons de fibres.

Ces paramètres sont assez souvent utilisés comme outils de base dans bon nombre d'approches théoriques, visant à mieux modéliser ce matériau.

1.6.1 L'espace moyen des fibres

La notion d'espace moyen a été introduite par [23]. Cette distance fictive tient compte de l'efficacité des fibres dispersées dans le béton, vis à vis de la direction de sollicitation, peut ce définir comme suit :

Un composite contenant un volume V_f de fibres dispersées uniformément dans le béton et orientées aléatoirement, est censé se comporter vis à vis de l'effort maximal, comme un composite armé de fibres , de σ équivalent, distribuées unilinéairement , espacées d'une distance « s » et orientées dans le sens de l'effort de traction .

1.6.2 Interaction fibre-matrice

Les performances des matériaux composites dépendent de la liaison fibre - matrice. La résistance d'adhésion inter faciale joue un rôle très important dans le comportement mécanique du béton renforcé des fibres, car l'interface est la zone de contact à travers laquelle se réalise le transfert de charge de la matrice à la fibre.

Une modification de l'adhésion fibre - matrice modifie le comportement du composite; les figure (1.10.a) et (1.10.b) illustrent ce chargement de fibres de carbone imprégnées de polymère.

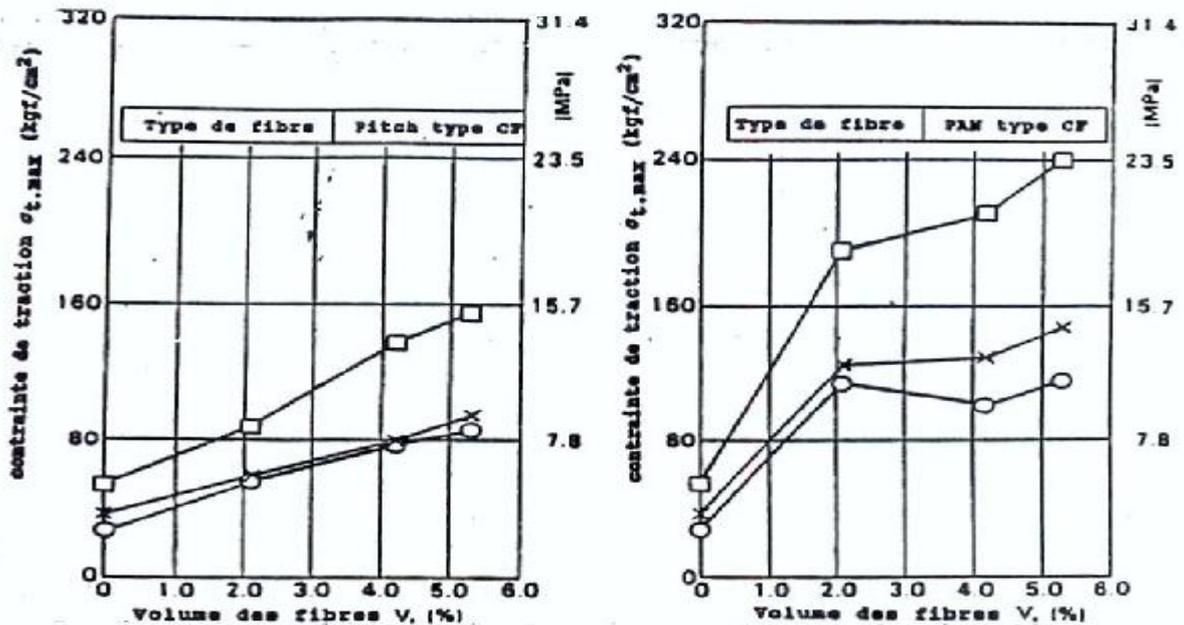


Fig : 1.10.a et b Relation entre la résistance en traction

Cette imprégnation se traduit par une augmentation de la résistance à l'interface et une diminution de la ténacité du matériau.

Dans le matériau composite il est donc nécessaire d'avoir une bonne compatibilité entre la matrice et les fibres.

Pour les tissus de verre, un traitement de surface « ensimage » permet d'éviter une attaque alcaline de la pâte de ciment. Le problème d'incompatibilité est résolu en utilisant les fibres de verre au zirconium, ou les fibres de verre enrobées de polymère.

- Les fibres en polypropylène présentent une bonne compatibilité avec le béton.

- Les fibres en acier présentent elles aussi une bonne compatibilité avec la matrice cimentuse. Cependant, il convient de souligner aussi que l'aspect de la surface, la longueur, sont aussi des paramètres qui interviennent pour une liaison efficace matrice-fibre.

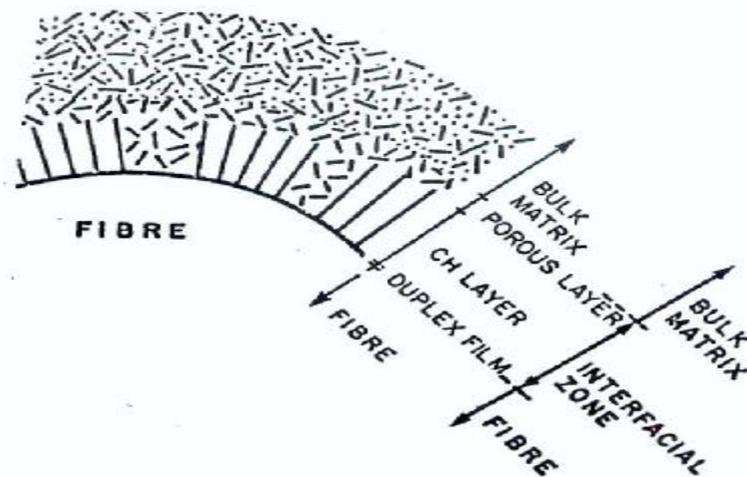


Fig : 1.10.c Description schématique de la zone d'interface de la matrice acier-fibre-ciment

1.6.3 Orientation et distribution des fibres

Les propriétés du béton de fibres dépendent beaucoup de l'orientation et de distribution des fibres par rapport aux directions de sollicitation qui peuvent être triaxiales, biaxiales, ou uniaxiale.

- Le matériau étant considéré comme homogène, une répartition non uniforme conduit à l'existence de zones de fragilité vis à vis de la fissuration; les études montrent qu'en s'orientant suivant des plans, les fibres engendrent un comportement anisotrope.

Les [24] ont mis en évidence pour différentes compositions la distribution et l'orientation des fibres d'acier dans le béton ainsi que leur influence sur les caractéristiques du béton de fibres.

Ils constatent que les fibres sont principalement orientées perpendiculairement à la direction du bétonnage: le matériau se comporte alors comme un matériau anisotrope aussi bien du point de vue des constantes élastiques que du comportement à la rupture.

Le degré d'orientation des fibres dépend principalement de la qualité du ciment, de la propagation du mortier dans le béton, de la taille du plus gros granulat, du pourcentage en fibre, de l'ouvrabilité du béton et de la longueur du déplacement de la matière durant le compactage.

Les caractéristiques du béton durci ne sont améliorées par l'ajout des fibres que si les fibres sont orientées dans le sens de l'extension maximale.

Lorsque les fibres sont orientées favorablement par rapport à la charge, les résistances en compression peuvent être augmentées de 15% et les résistances en flexion de plus de 90 %.

Les propriétés de déformation et la consommation d'énergie dans les essais de compression intégrant la contrainte de déformation au delà de la résistance ultime intégrant la contrainte de déformation au delà de la résistance ultime, sont meilleures avec le béton fibreux quelque soit la direction d'essai (fig 1.11a).

Les orientations préférentielles des fibres peuvent être mises en évidence par des essais mécaniques. Les figures (1.11b) et (1.11c) nous présentent deux essais issus des travaux de [25].

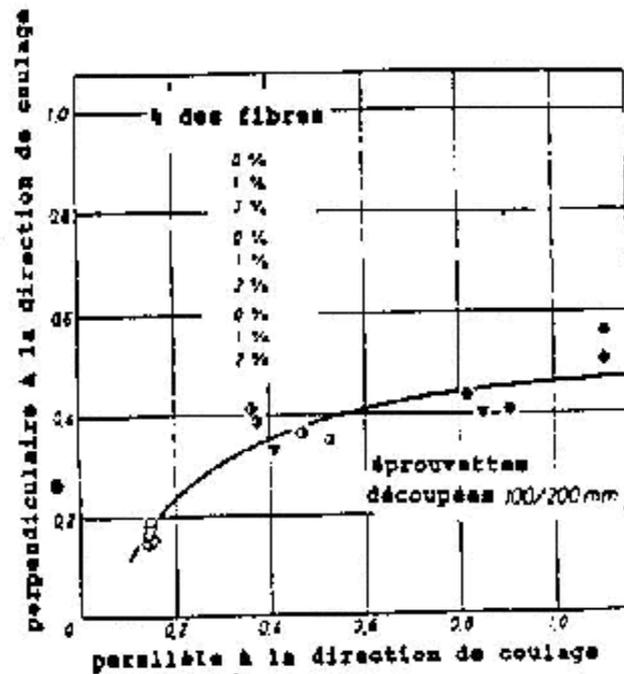


Fig. 1.11.a Energie consommée (en J/cm³ de béton) [24]

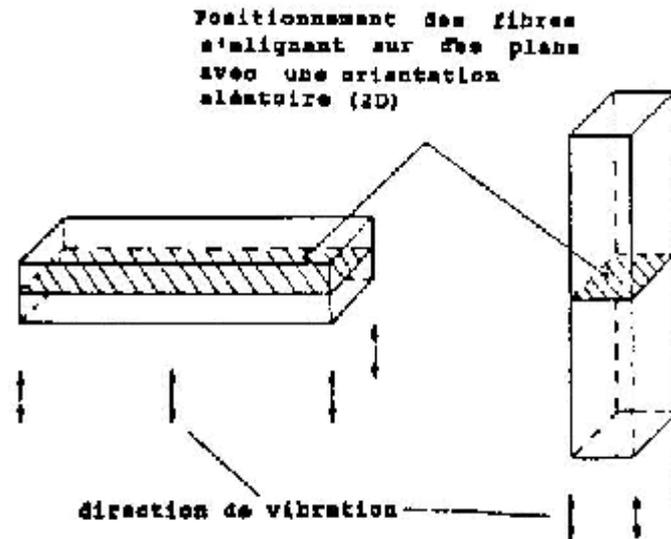


Fig : 1.11.b L'effet des vibrations sur l'alignement des fibres

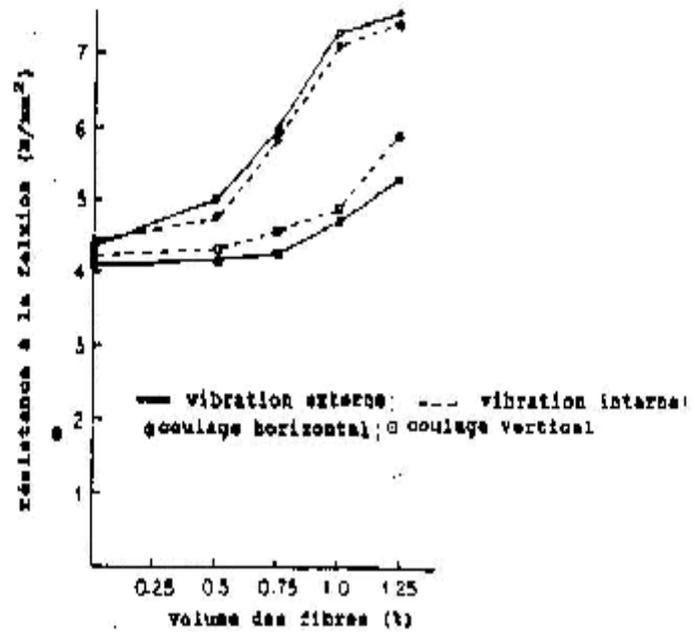


Fig : 1.11.c Influence de la méthode de coulage et du type de vibration sur la résistance en flexion

1.7 Le béton de fibres

1.7.1 Le béton de fibres – Comment ?

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

- Béton de qualité répondant aux normes habituelles de béton classique ; la jonction de fibres ne permet pas, à priori d'améliorer les performances du béton.
- Liaison étroite entre les fibres et le béton pour remédier à quelques phénomènes internes.
- Bonne répartition des fibres dans le béton afin pour mieux cerner toute déformation.

1.7.2 Le béton de fibres - pourquoi ?

Le comportement particulier du béton de fibres permet :

- Prendre en compte la résistance à la traction directe ; en effet la rupture, si elle est atteinte, n'est plus brutale, par ailleurs on peut déterminer des moments de fissurations et de rupture permettent l'approche de dimensionnement des ouvrages en maîtrisant le risque de fissuration qui est l'objet de notre recherche.

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

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

1.7.3 Le béton de fibres – qu'apporte t'il ?

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

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

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

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

Cette étude s'intéresse aux fibres métalliques. Elle demeure aujourd'hui la fibre commercialement la plus vendue et bien sûr disponible sous des formes et dimensions les plus variées. Ces fibres présentent un module d'élasticité de 210 GPa, une masse volume de 7.85 t / m³ et une résistance à la traction de 1 à 2 GPa. Elles existent sous diverses formes et longueurs. L'élanement est souvent compris entre 30 et 150 pour une longueur allant de 6,4 à 76 mm. Le pourcentage volumique de fibres métalliques dans le béton varie de 0.3 % à 3 %. L'optimisation du pourcentage de fibres, de la longueur, et de la forme a donné lieu à de nombreuses études.

Dans le cadre de ce travail, **les caractéristiques de l'interface fibre-matrice ne sont pas prises en compte**, et sont supposées identiques pour les différentes fibres métalliques utilisées. Cette hypothèse est en contradiction avec certains résultats expérimentaux [26].

1.8 Les propriétés mécaniques du matériau

1.8.1 – Discussion sur le matériau de référence, et la notion d'échantillon représentatif :

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

Même avec des formulations identiques pour les deux types de béton (avec et sans fibres), il est constaté des différences d'ouvrabilité, d'homogénéité et de teneur en air occlus qui affectent les résistances mécaniques. C'est pourquoi plusieurs auteurs dont [27],

[28] et [29] recommande une comparaison basée sur le même dosage en ciment et la même ouvrabilité. Une telle approche est utile pour les applications pratiques car l'ouvrabilité est souvent un paramètre imposé dans la mise au point d'une formulation de béton.

Les chercheurs [30], proposent une démarche scientifique d'optimisation de la formulation des composites que sont les bétons renforcés de fibres métalliques. La méthode repose sur l'hypothèse (vérifiée expérimentalement) que, pour un rapport (Eau/Ciment) fixé le béton le plus compact est également le plus maniable. Ils aboutissent aux conclusions suivantes :

- La composition des bétons renforcés de fibres métalliques est totalement différente de celle d'un béton courant, ce qui traduit le fait q'un composite fibré ne s'obtient pas en introduisant simplement des fibres dans une matrice.
- Du point de vue de la maniabilité et de la compacité, les fibres métalliques jouent un rôle similaire aux gros gravillons.

Ainsi, l'étude de composite à composition optimisée semble être une voie prometteuse pour les études.

L'aspect important [31], lors des études sur le béton renforcé de fibres est la représentativité des essais, étant donné sa très grande hétérogénéité, principalement due à l'orientation préférentielle des fibres, lié notamment à la vibration.

Cette observation a conduit l'ACI et la RILEM à mettre en chantier des recommandations en vue d'une normalisation des essais, ce qui paraît très souhaitable étant donné la disparité des méthodologies et des dimensions des éprouvettes utilisées par les différents chercheurs.

Bien sûr deux démarches d'étude sont proposées, comme le rappelle [30] soit réaliser un très grand nombre d'essais sur des éprouvettes de petites dimensions et ensuite faire une analyse des résultats, soit réaliser peu d'essais mais sur des éprouvettes de très grandes dimensions de manière à se placer à une échelle où la dispersion devient faible.

Néanmoins, les corps d'épreuve retenus pour la caractérisation s'efforcent d'être un compromis entre les tailles suggérées part les hétérogénéités du matériau et les dimensions des éléments de structures à réaliser.

1.8.2 Résistances statiques

Cette partie se penche à résumer le rôle des fibres sur le comportement mécanique du matériau.

1.8.2.1 Compression

Les différents chercheurs sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certain cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution. Cette diminution peut être causée par une mauvaise compacité due à un excès de fibres, ou à une mauvaise composition.

[5], a trouvé que l'incorporation de fibres de polypropylène dans la matrice béton apporte une légère amélioration lorsque le pourcentage de fibres est faible et une diminution pour de forts pourcentages.

Dans la matrice, la fibre peut avoir deux effets contradictoires : d'une part maintenir les fissures, ce qui est favorable pour la phase post pic, d'après[31], les résistances à la compression de béton de fibres métalliques sont inférieure à celle de béton sans fibres. Et que la présence des fibres dans la matrice permet d'améliorer la ductilité des éprouvettes.

Cet effet est dû aux fibres qui continuent à « coudre » les fissures qui se produisent. Ainsi, la rupture fragile caractéristique du béton traditionnel n'est plus observée en présence des fibres. Mais d'autre part créer des défauts supplémentaires à l'interface fibre-mortier qui peuvent servir d'amorce à l'endommagement et donc limiter la charge maximale.

D'après [30], les résistances à la compression de béton de fibres métalliques sont inférieures à celles de bétons sans fibres sauf pour le béton armé de fibres de fonte dosé à 0.5% volume de fibres.

D'après [32], les orientations préférentielles de fibres en fonction de certaines procédures de mise en œuvre traduite par la relation contrainte- déformation, les valeurs ultimes de résistance et le module de rupture changent en fonction de la direction de sollicitation. Le mode de rupture par glissement dans l'éprouvette donne les résistances les plus faibles (fig. 1.13)

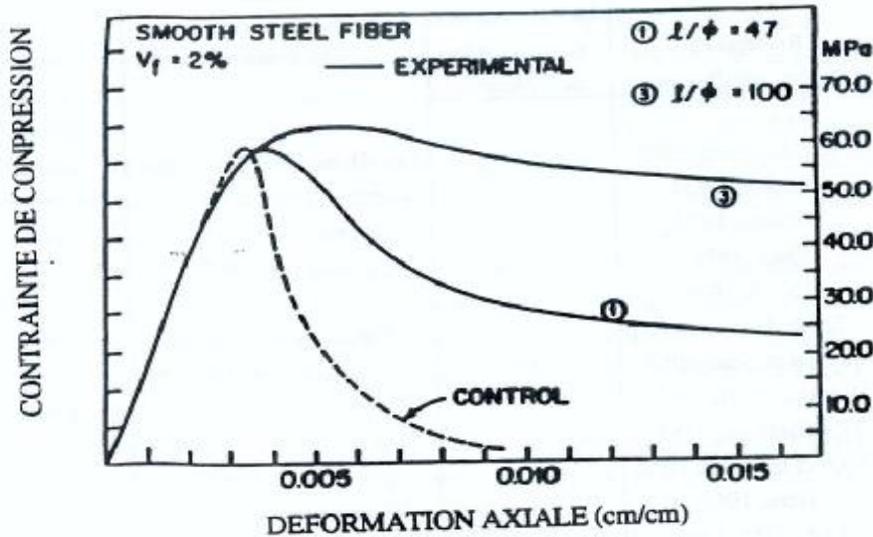


Fig : 1.12 Courbes « contrainte- déformation » en compression

D'après[34], pour les mélanges à 45% d'eau sans sable, on note une amélioration de la résistance à la compression de la matrice avec les fibres métalliques et les fibres de bambou jusqu'à une teneur de ces dernières ne dépassant pas 25 % ; au-delà la résistance est diminuée.

1.8.2.2 Traction

D'après la bibliographie, peu d'essais ont été réalisés en traction directe, car l'essai est délicat et coûteux. D'une manière générale, on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement de la forme des éprouvettes, du type d'essais, de paramètres liés à la géométrie et au pourcentage volumique des fibres. Elles peuvent atteindre 30% pour les fibres résistantes (exemple : fibres d'acier) voir [33]. Elles ne sont plus faibles ou nulles lorsque les fibres ont une résistance inférieure, comme c'est le cas des fibres de polypropylènes.

D'après [31], la présence des fibres métalliques améliore la résistance à la traction. Cette amélioration n'est pas très importante et l'allure des courbes se rapproche de celle des courbes contrainte-déformation.

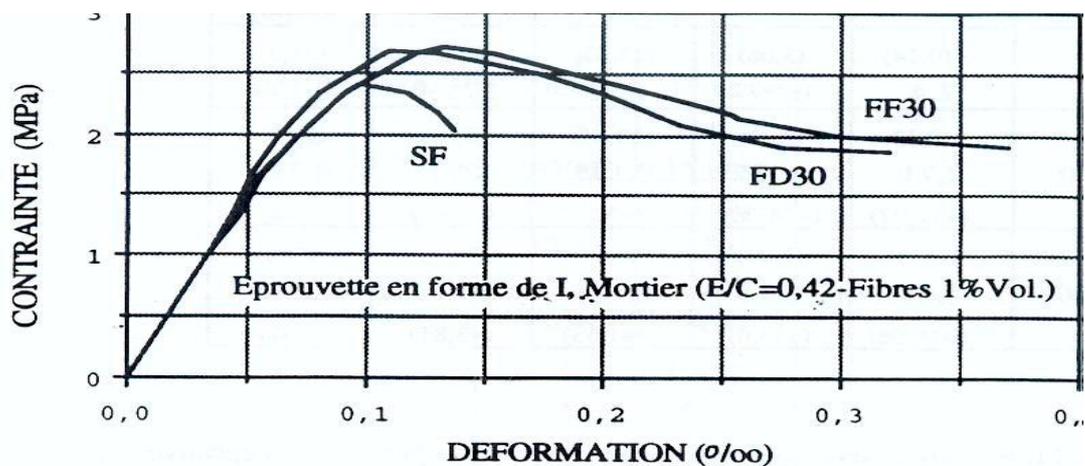


Fig : 1.13 Courbes « contrainte- déformation » en traction [31]

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la traction du béton renforcé de fibres montrent qu'il y a une légère augmentation de la contrainte ultime, avec une présence d'une phase post pic.

Tableau : 1.3 Etudes sur la résistance à la traction

Références (fibres métalliques)	La présence de fibres effet sur la traction ?	Commentaires
Edington. 1974 Majumadar. 1975 Shah. 1978 Serna Ross. 1985 Rossi. 1989 R. Cabrillac. 1991	<p style="text-align: center;">oui</p>	<p style="text-align: center;">Légère augmentation</p>

1.8.2.3 Flexion

L'augmentation de la résistance en flexion du béton renforcé de fibres métalliques est beaucoup plus important, elle peut atteindre 200% et plus.

[35] indique une tendance générale du béton de fibres lisses.

Des courbes sont en fait des moyennes d'un certains nombres de points très dispersés, car comme la résistance en traction, la flexion varie avec la géométrie de la fibre, son orientation et son adhérence à la matrice. Avec des fibres à crochets, le même auteur fournit des résultats encore plus encourageants (fig.1.14), ces résultats sont obtenus aussi bien pour des éprouvettes fléchies, que pour essais de fendage sur éprouvettes creux.

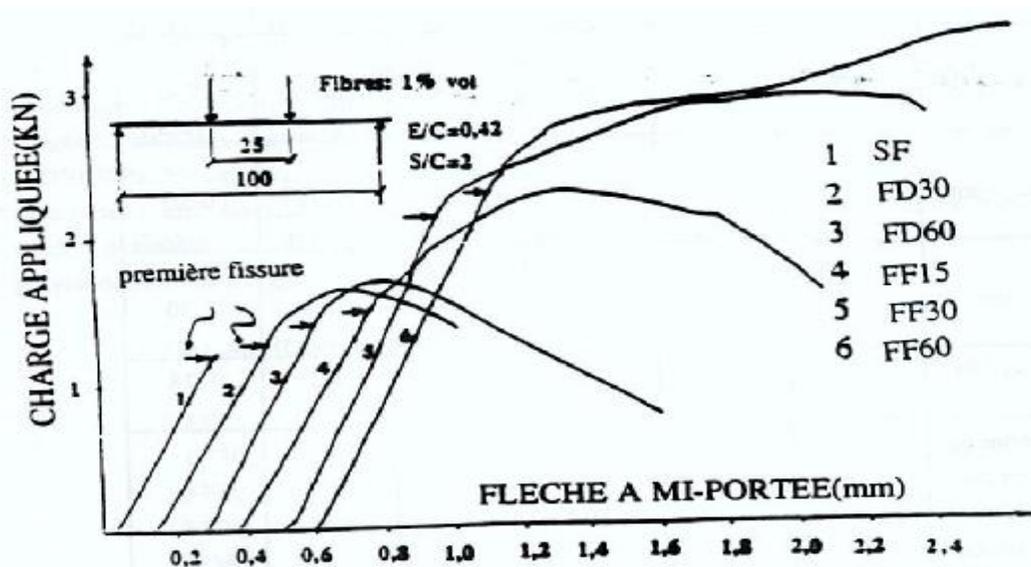


Fig : 1.14 Augmentation de la résistance en flexion pour des fibres d'acier à crochets, en fonction de l'élancement et du % de fibres.

Avec des fibres métalliques 1% en volume, [31] trouve que la présence des fibres augmente fortement la résistance à la flexion, cette augmentation est de l'ordre de 26% à 189% suivant le type de béton de fibres testé. Avec une conclusion dans ces travaux, que les fibres modifient le mécanisme d'endommagement sous sollicitation statique, la première fissure est retardée, de plus les fibres jouent un rôle de couture sur les fissures ce qui augmente la charge maximale de ruine et lorsque la longueur des fibres augmente, les valeurs des forces relatives à la charge ultime sont plus élevées, ceci est lié à la longueur et la forme des fibres (ancrage améliorés), mais aussi aux orientations plus favorables des fibres longues.

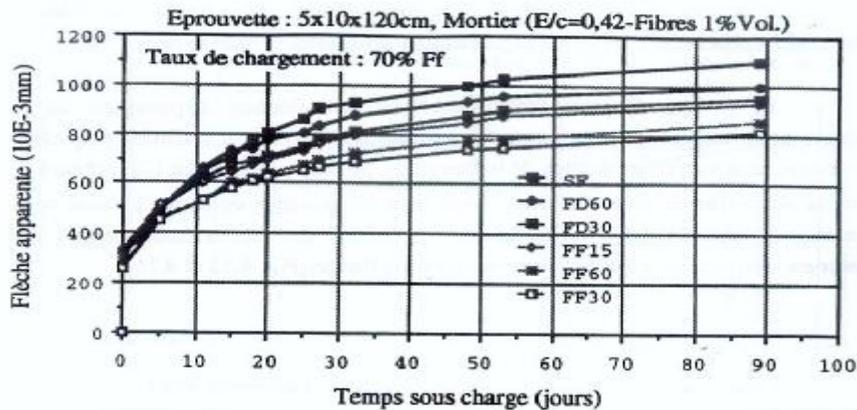


Fig : 1.15 Evaluation de la flèche en fonction du temps (t), pour différents types de mortier sous un taux de chargement de 70% [31].

1.9 Formulation

1.9.1 Objectif d'une formulation

Les performances requises pour un béton impliquent :

- Une consistance adaptée à sa destination, généralement définie par l'affaissement du cône d'Abrams.
- Des qualités de résistances à différents échéances, le plus souvent à 28 jours, on notera f_{28} cette résistance.
- Des qualités durables qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment. (C_{min}) et un rapport E/C maximum (E/C max).

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

Il existe des logiciels efficaces qui permettent de traiter toute la partie non expérimentale du travail de formulation, même avec de tels outils, il est indispensable de comprendre comment les différents paramètres influent sur les qualités du béton ou mortier, car ces paramètres sont trop nombreux et trop variable pour qu'il puissent être pris en compte dans toute leur complexité (sans compter que des produits comme les adjuvants en constante évolution).

1.9.2 Formulation des B.F.M

Il est extrêmement difficile de déterminer l'apport exact des fibres par rapport à un béton conventionnel car le nombre de paramètres influents est considérable. Ainsi la comparaison entre un béton traditionnel et un béton renforcé de fibres ayant la même composition présente l'inconvénient de ne pas tenir compte du fait que l'addition des fibres modifie les caractéristiques de la matrice. Si la formulation retenue est celle d'un béton classique inadaptée à la réalisation d'un béton de fibres, on obtient en introduisant les fibres un composite de mauvaise qualité présentant notamment des problèmes de ségrégation de fibres au cours du malaxage et de la mise en place.

Si, au contraire, on met au point une formulation spéciale pour le béton renforcé de fibres cela permet d'obtenir un composite de très haute qualité dont la matrice est le plus souvent un micro-béton ou mortier, les performances obtenues ne sont plus directement comparables à celles d'un béton normal.

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», tels que ceux évoqués dans la préface, c'est-à-dire comportant au moins 50 kg/m^3 de fibres, il est impératif de formuler la matrice.

1.9.3 Description de la méthode

Il s'agit de la méthode [36] qui à été développée au laboratoire central des ponts et chaussées, il y a une dizaine 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 de fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

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

1) Le cahier de 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 différent 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.

Remarques :

1- La maniabilité peut se déterminer suivant différentes méthodes expérimentales. Ainsi, il existe divers appareils qui permet de déterminer, au travers des 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, il 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, il 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.

2- Il est 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. 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 granulat est grand
- que le pourcentage de fibres est élevé.

D'après une étude de [37] sur l'effet des fibres incorporés dans un béton sur son affaissement ; et d'après [38] sur l'effet de la teneur en fibres d'acier et de leur élancement sur l'ouvrabilité.

$$V_f^o = 2.0 W_P / 0.95$$

* W_P : pourcentage en poids de fibres de polypropylène par rapport au poids sec des constituants.

* V_f^o : pourcentage en volume des fibres (acier et polypropylène) dans le béton

$$V_f^o = 2.0 W_P / 0.95$$

Plusieurs auteurs, dont [35] conseillent de limiter le rapport $G / (G + S)$ à 0.5, G étant le poids du gravillon (grains > 5 mm).

D'après ce même chercheur, la granulométrie du béton doit être étroitement liée à la dimension des fibres et des granulats et les granulats doivent être de dimension telle qu'un encadrement par des fibres soit possible (figure 1.16). 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 1.17) illustre ce phénomène d'après [39].

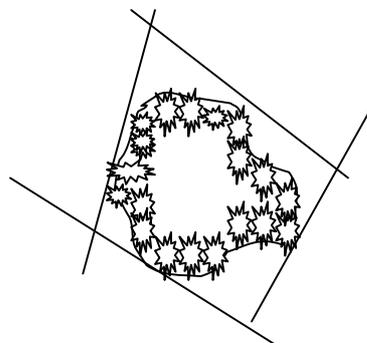


Fig : 1.16 Encadrement d'un granulat

Teneur maxi en fibres (% vol)

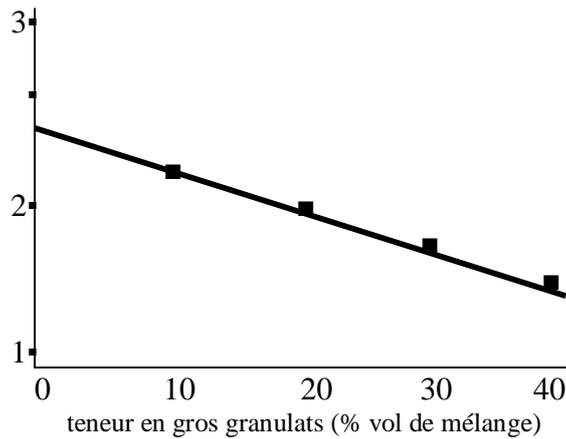


Fig : 1.17 Teneur maximal en fibres en fonction de la teneur en gros granulats

Le comité des grands barrages aux Etats-Unis (Uscold) recommande certains fuseaux granulaires 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 suivants (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 [40] au LCPC. Sa méthode lui permet de déterminer un squelette minéral optimal. La méthode est dérivée de celle de [36] et elle utilise le module de finesse. Ce module de finesse est le centième de la somme des refus, en pour cent et en poids, sur les tamis suivant 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. [40] a ainsi étudié les variations de l'affaissement au cône d'Abrams, en fonction du module de finesse (figure. 1.18) et a ensuite étudié les modifications provoquées par la présence des fibres. Il a ainsi constaté que, pour obtenir la composition optimal, le module de finesse devait être d'autant plus faible que le pourcentage de fibres était grand.

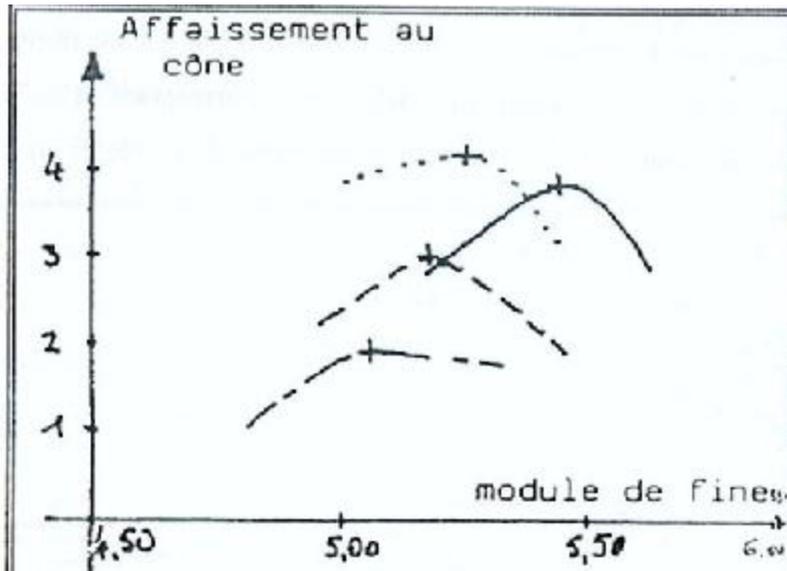


Fig : 1.18 Affaissement au cône en fonction du module de finesse

En reportant sur une courbe le pourcentage de fibres en fonction des modules de finesse correspondant à la maniabilité maximale, [40] a observé que, pour chaque type de béton ces points étaient alignés (figure. 1.19), à condition que le pourcentage des fibres reste inférieure à 1.5 %. De plus, les droites sont concourantes en un point, correspondent à un module de finesse de 5.16 et à un dosage de fibre de 1.8 %. Ainsi connaissant la granulométrie de deux granulats, on peut déterminer la composition optimale du béton sans fibres par la méthode [36], en déduire le module de finesse correspondant (m_{fs}) 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.

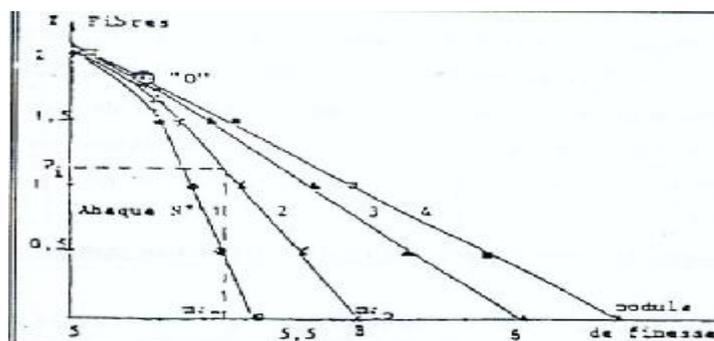


Fig : 1.19 Abaques reliant la composition granulatoire optimale du béton au pourcentage en fibres.

L'étude de [40] 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 au – delà duquel correspondant au slump limite semblaient se placer sur des courbes (courbes d'isomaniabilité sans ségrégation) (figure. 1.20).

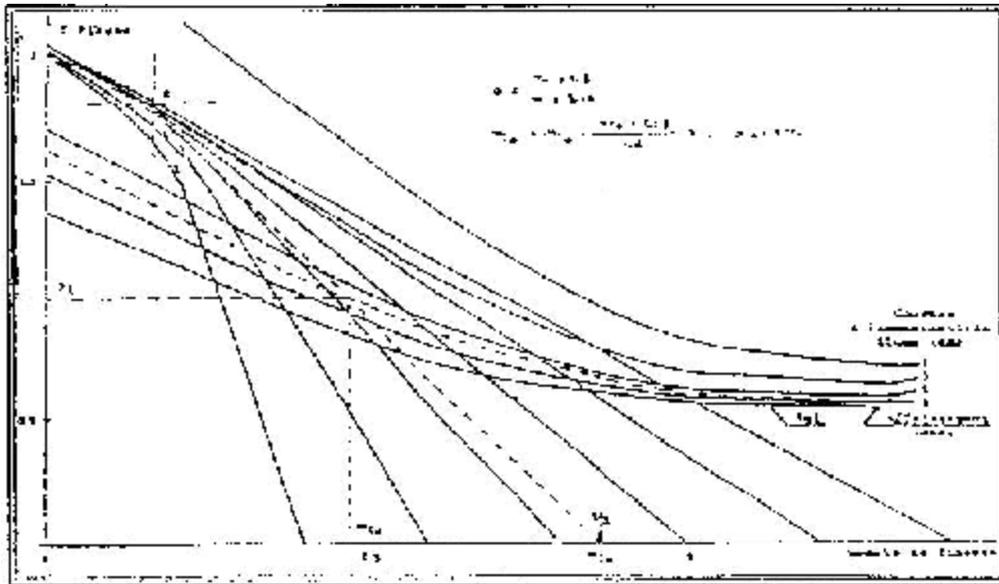


Fig : 1.20 Abaque permettant d'établir une formulation de béton de fibres

Ces résultats se recourent avec ceux obtenus par [41]. 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 [40] 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 particulières, et jusqu'à 2 % et plus, en contrôlant bien la fabrication effet, avec plus de 1 % de fibres, une faible variation de 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 en 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.

1.9.3.1 Modification du squelette granulaire d'un BFM par rapport à un béton sans fibres.

Comme évoqué précédemment, à constituants identiques, le squelette granulaire optimal d'un BFM peut être différent de celui du béton non fibré.

L'importance des modifications observées va dépendre de paramètres divers parmi lesquelles on peut citer : le type de fibre, le pourcentage de fibres, le rapport longueur de la fibres / diamètre du plus gros granulats.

De manière générale, on constate que, pour une maniabilité donnée, la quantité de liant, ainsi que le rapport $S / S+G$ optimal du point de vue rhéologique augmentent avec le pourcentage de fibres et avec le rapport (L_f / Φ_g) , lorsque celui-ci varie approximativement, entre 1 et 3.

Au contraire, lorsque (L_f / Φ_g) est inférieur à 1 ou supérieur à 3, seul intervient de manière significative le pourcentage de fibres.

Dans la (figure 1.21) sont présentés des résultats qui illustrent ce qui précède d'après [42].

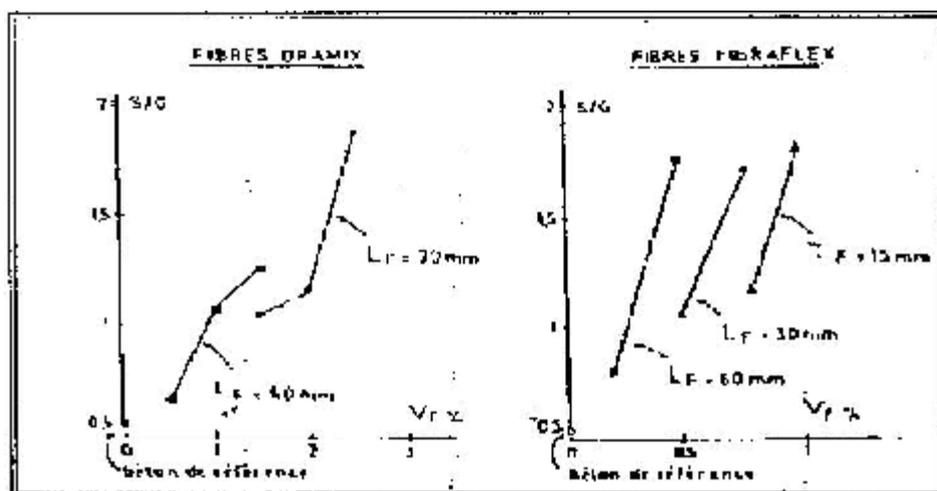


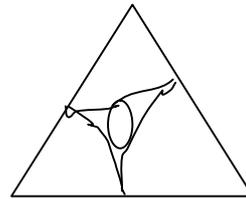
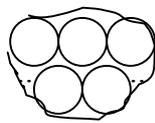
Fig : 1.21 Exemple de l'influence de la longueur des fibres et du % incorporé sur le rapport S / G du BFM

On constate, au regard de ces figures, que l'influence sur le squelette granulaire est plus important dans le cas des fibres Fibralex, qui sont des rubans de fonte amorphe de très faible épaisseur, que dans des fibres Dramix qui, elles sont des fibres cylindriques en acier tréfilé, munis de crochets à leur extrémité. Ceci illustre ce que est dit précédemment sur l'importance de la géométrie de la fibre.

Cette différence s'explique très bien quand on s'attache à comprendre l'origine physique de la modification nécessaire du squelette granulaire d'un BFM.

L'introduction de la fibre au sein du squelette granulaire va se traduire, localement, c'est-à-dire autour de chaque fibre, par un « desserrement » du squelette granulaire, similaire à un effet de paroi. Ainsi, un certain volume des gros granulats va être remplacé par un certain volume de fibres, ce qui conduit à un « enrichissement » en éléments fins du squelette granulaire. Cette modification de l'empilement granulaire est schématisée dans la (figure. 1. 22) au travers d'une illustration pédagogique qui consiste à analyser le problème tridimensionnel de cet empilement par une analogie bidimensionnelle.

Compacité optimale d'un béton sans fibres



L'espace est pavé de triangle équilatéraux

Compacité optimale d'un BFM

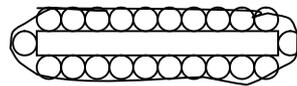


Fig : 1.22 Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BFM comparé à celui d'un béton non fibré

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

1.9.3.2 Développement d'une approche plus théorique pour l'optimisation de la composition des BFM.

La méthode de formulation présentée ci-dessus, bien que très efficace, présente l'inconvénient d'être lourde dans sa mise en œuvre. En effet, normalement, à chaque fois que les constituants de la matrice, le type et la géométrie de la fibre change, il faut, pour optimiser la formulation du BFM, reconstruire la courbe maniabilité en fonction du rapport $S / S+G$, ce qui nécessite, en général, de réaliser entre cinq et dix gâchées. C'est ce qu'on appelle une approche systématique. Compte tenu du fait qu'actuellement le type et la géométrie des fibres couramment utilisées sont encore en nombre assez restreint et qu'une certaine expérience dans la formulation des BFM est déjà acquise, il est vrai que trois ou quatre gâchées sont généralement suffisantes pour déterminer l'optimum granulaire du BFM. Mais, il n'en est pas de même lorsque de nouveaux constituants, de nouvelles fibres ou de nouveaux pourcentages de fibres sont utilisés. Il est donc intéressant de développer une approche théorique (qui ne ferait alors intervenir aucune contribution expérimentale, ou du moins, limitée à la seule calibration du modèle) qui permet, dans une première étape, d'approcher l'optimum de compacité du BFM (approche de « dégrossissage »), puis, dans une seconde étape, d'affiner la détermination de cet optimum en réalisant, au maximum trois gâchées.

C'est cette méthodologie qui est développée depuis des années au LCPC, sous la direction de Larrard. Ainsi, un modèle théorique d'empilement granulaire, le modèle de suspension, a donné naissance au logiciel RENE qui permet, de manière très facile et en temps très bref, de réaliser la première étape de la méthodologie évoquée ci-dessus.

Il est prévu d'étendre cette approche aux BFM. Pour ce faire, il est nécessaire, comme pour les grains du squelette granulaire, de déterminer, dans le cadre du modèle linéaire de compacité, les fonctions d'interaction entre les fibres et les grains de différents diamètres. Pour parvenir à cet objectif, un important travail expérimental reste encore à réaliser en amont.

1.9.4 Mise en œuvre du béton de fibres

Pour mieux comprendre et dominer la formulation des BFM, on est obligé de se pencher sur les difficultés liées à la mise en œuvre du béton de fibres.

L'introduction des fibres courtes distribuées dans les matériaux à base de ciment cause des problèmes d'ouvrabilité, on assiste à une diminution de la maniabilité et puis des fois à la formation de pelote de fibres ou oursin résultant de l'enchevêtrement des fibres.

1.9.4.1 Composition du béton de fibres

Pour déterminer la composition du béton de fibres il faut rechercher la formulation la plus maniable dont la mise en place nécessite le moins d'énergie, et qui sera la plus compacte après mise en place, donc assure un moulage et un serrage correct du matériau avant la prise de ciment.

On ajoute pas n'importe quelle fibre à un mortier ou béton classique, il convient d'étudier au préalable une composition adaptée, car la plus grande efficacité des fibres ne sera obtenu qu'après une optimisation de la composition pour déterminer, le LPC de paris à fait varier le rapport sable/gravier déduite de la méthode [36], (figure. 1.23).

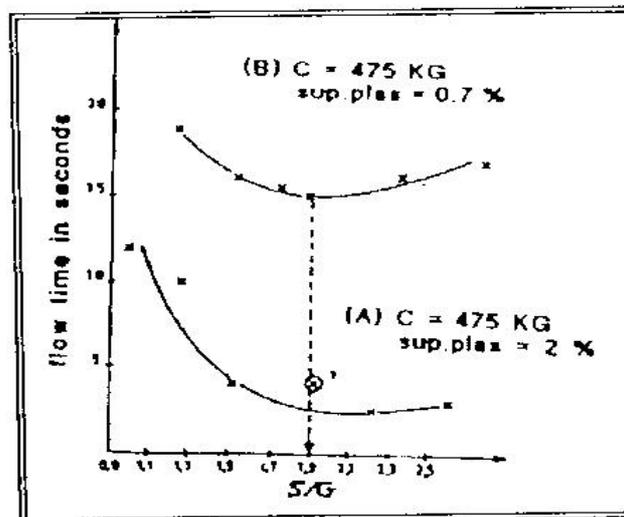


Fig : 1.23 Exemple de la composition optimal d'un BFM

1.9.5 Applications pratiques

Les bétons armés de fibres ont fait l'objet de nombreuses réalisations, concurrençant les plastiques surtout dans le domaine des pièces minces. Le développement de ce composite dans la construction est tributaire des techniques d'élaboration et aussi surtout du prix de la fibre; les domaines d'application sont actuellement variés et étendus. Les bétons les plus utilisés sont ceux qui sont renforcés avec des fibres d'acier et des fibres de verre ;

- Dans le premier cas, des applications pratiques ont été faites surtout en tant que couche d'usure pour la réparation des revêtements routiers , pistes d'aérodrome, tabliers des ponts: sa résistance aux chocs et sa déformabilité l'y prédestinent ; il est aussi utilisé pour la stabilisation des parois rocheuses (méthode de projection) , ce qui évite la fixation des grillages ordinaire employés; ce même procédé s'applique aussi aux tunnels et aux galeries souterraines; la résistance aux chocs des fibres d'acier rend le béton armé intéressant pour la fabrication des pieux.

- Dans le cas du béton renforcé de fibre de verre, son application dans les panneaux de revêtement des façades découle de la stabilité qu'offre « la technique telles que l'emboutissage, pressage, il est possible d'obtenir une gamme de produits de formes variées telles que.

- Huisseries et dormants des fenêtres.

- coffrage pour les pièces de bétons coulées sur place.

- Gaines de ventilation, boisseaux, palplanches, tuyaux, et....

Les ciments armés de fibres de verre pourraient remplacer les revêtements ignifugés isolants (constructions navales) en amiante projetée.

En ce qui concerne les bétons de fibres de polypropylène, si le domaine d'application est très voisin de celui de la fibre de verre, il existe cependant certains procédés qui permettent un emploi plus spécifique. Grâce à un béton très plastique, qui se travaille comme un mastic fixotrope, on peut laisser sur surface des empreintes soit manuelles, soit mécaniques, d'un bel effet décoratif.

Cette méthode de fabrication évite l'emploi de coffrages spéciaux à relief. Les fibres invisibles en surface, une fois le béton durci.

1.9.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que sous appellation "béton de fibres", il existe une grande famille de matériaux composites. Dans cette étude, l'on s'intéresse uniquement à une sous famille, celle des bétons de fibres métalliques.

Les problèmes liés à l'élaboration du matériau, nature des matériaux (toujours locaux), composition pondérale, méthode de mise en oeuvre, sont importants. Néanmoins, il n'existe pas de méthode simple pour estimer le degré d'optimisation des formulations, (qualité des interfaces fibres-matrice, orientation des fibres, porosité induite, défauts...). Ceci limite un peu les conclusions qui peuvent être tirées d'études comparatives menées à partir des résultats publiés. Nous retiendrons de ceci, qu'il est important de bien caractériser les matériaux testés et que la référence au béton sans fibres n'est totalement objective.

Les études mécaniques rapportées dans la littérature donnent souvent des résultats globaux sans séparer les caractéristiques matériau, et les effets induits par l'élément de structure testé (fissuration, multifissuration). De cette remarque, il découle la nécessité de compléter les approches globales par des approches très locales. Dans le cadre de ce travail, nous restons au niveau de l'approche globale, en essayant toutefois d'expliquer phénoménologiquement les constatations expérimentales, grâce à quelques manipulations plus instrumentées.

Brièvement, sont rappelées, dans le chapitre, les caractéristiques physiques des bétons de fibres, en mettant en évidence l'influence de l'apport des fibres. En complément, il est noté que la résistance à la macro-fissuration initiale dépend essentiellement des caractéristiques qui gouvernent la résistance de la matrice, les paramètres liés aux fibres (type, pourcentage, dimensions...) modifiant bénéfiquement assez peu cette valeur. En bref, les fibres limitent le phénomène de propagation et d'ouverture des fissures, ceci est largement apprécié par les utilisateurs.

L'étude bibliographique menée avec une méthode comparative apporte des éléments assez précis sur les paramètres expérimentaux qui influencent les résultats : fréquence d'essai, dimension des éprouvettes, interprétation des mesures.

Les fibres d'acier sont souvent produites sous différentes formes (droites, lisses, ondulées, à crochets accolés...). Les fibres d'acier ont donné lieu à de nombreuses recherches pour développer leur emploi dans le béton en tant que dallages, bétons projetés, éléments préfabriqués.

Cette étude se propose d'étudier le béton renforcé de fibres métalliques en partant des mécanismes observés et en essayant d'analyser les phénomènes qui se superposent lors des

observations sur les essais de retrait et la perte en poids. Ainsi, la prise en compte du temps et de la dessiccation du matériau sont des éléments importants.

Cette démarche est adoptée pour suggérer les relations existant entre différents comportements physiques dans le matériau.

Deux types de fibres ont été retenus. Ces fibres se distinguent par leur nature, leur géométrie et leur profil en terme adhérence au béton, mais aussi par le mode de dispersion au sein de la matrice, l'utilisation des déchets industriels afin de minimiser le stockage qui nouille à l'environnement.

La modeste recherche bibliographique nous a permis de bien comprendre les différents phénomènes qui infligent au béton des dommages spécialement qui sont due à son environnement et d'en faire ressortir les paramètres influents.

Le programme expérimental établi dans notre laboratoire étudie le comportement à l'absorption capillaire et au vieillissement du matériau composite. Nous utilisons la même formulation de mortier de fibres et les mêmes dimensions géométriques des éprouvettes.

CHAPITRE II

Etat de connaissances sur le phénomène de retrait

CHAPITRE II

*

Etat de connaissances sur le phénomène de retrait

Lorsque le béton n'est pas soumis à un chargement extérieur, ce séchage entraîne un retrait ; diverses explications physiques ont été avancées pour expliquer ce retrait. Dans les ouvrages réels, le béton est bien sûr soumis à des variations climatiques importantes. Hors ces variations climatiques peuvent avoir des conséquences majeures sur les ouvrages en génie civil, il reste donc important de bien connaître le phénomène de retrait.

Le premier axe comporte une recherche bibliographique traitant le phénomène du retrait : définition, types de retraits, paramètres influents, mécanismes.

Le deuxième axe expose le programme expérimental retenu en donnant les caractéristiques et la méthodologie des essais sur le béton renforcés de fibres métalliques.

2.1 Introduction

La pâte de ciment (donc le béton) manifeste des variations dimensionnelles en l'absence de chargement, ces variations sont surtout en relation avec la réduction de volume liée au départ ou à la consommation d'eau au sein du béton (fig. 2.1 (b)). Par opposition, un gonflement (**wetting**) s'observe par immersion de l'éprouvette (ou lors de conditions hygrométriques saturées) (fig. 2.1 (a)) [43]

Plusieurs types de retrait se succèdent à partir de la fabrication du béton et jusqu'à maturité.

Les dénominations dans la littérature sont nombreuses et parfois multiples pour un même type de retrait. Ces derniers sont, en pratique les plus importants, en effet :

- Les retraits précoces ou retrait au très jeune âge, en cours de prise et de durcissement (premiers jours) provoquent les fissurations par traction des bétons d'ouvrage.
- Le retrait par dessiccation, coulé au fluage doit être pris en compte dans le calcul des pertes de précontraintes et de redistribution des charges dans les ouvrages hyperstatiques.
- La somme des divers retraits s'ajoute à la contraction thermique pour ouvrir les joints (pour les revêtements routiers), cette ouverture réduit le transfert de charge d'une dalle à l'autre et accélère l'usure.

Il existe un grand nombre de résultats expérimentaux sur le retrait accumulés depuis le début du siècle. Ces dernières années, un effort important a été fait pour en tirer des formules empiriques permettant de calculer le retrait des pièces dans des conditions variées. Ces formules peuvent en effet, être très utiles; mais [43] a souligné la nécessité de comprendre les phénomènes physiques en jeu, elles appellent à fixer leurs limites de validité.

Dans cette recherche bibliographique, on a essayé d'expliquer le phénomène de retrait surtout à long terme, de donner ses différents types et montrer la possibilité de les mesurer séparément et faire sortir les paramètres influents sur le retrait.

2.2 Le retrait

C'est la déformation spontanée du béton en l'absence de tout chargement mécanique. Tout au long de la prise et de durcissement d'une pâte de ciment, cette déformation se décompose en trois phases.

1 – Le retrait dit d'auto-dessiccation "**contraction Le Chatelier**" [44]. C'est le premier retrait d'origine chimique qui débute dès la mise en place dans les moules. Il résulte du fait que le volume des hydrates est inférieur à la somme des volumes d'eau et de ciment anhydre qui entrent dans la réaction d'hydratation. Ce type de retrait est appelé aussi "**retrait plastique**" [45].

2 – Le gonflement qui suit le premier retrait, dû à l'élévation de température du béton causé par le dégagement de chaleur qui accompagne la réaction d'hydratation. A cela suit un gonflement d'origine chimique qui se manifeste au cours de l'hydratation et qui est surtout lié à la formation d'étringites.

3 – Après la fin de la prise, un second retrait beau coup plus intense que le premier apparaît et prend le pas au bout d'une dizaine d'heures sur le gonflement.

A l'ensemble de ces variations volumiques, il apparaît le retrait à long terme provoqué par :

- Le vieillissement qui correspond à l'évolution structurelle de la pâte de ciment par la poursuite de l'hydratation et également par carbonatation.
- La dessiccation due essentiellement à l'évaporation de l'eau libre interne à la structure. L'équilibre entre l'hygrométrie interne et l'hygrométrie externe s'établit à plus ou moins long terme suivant la géométrie des éléments (fines ou massives). L'ordre de grandeur de la durée d'établissement de cet équilibre est une dizaine d'années.

Le retrait est phénomène complexe d'équilibre hygrométrique, qui dépend non seulement des facteurs internes tels que la nature et dosage du ciment, la compacité et la granulométrie du mortier ou du béton, mais aussi des facteurs externes, tels que l'hygrométrie et la température.

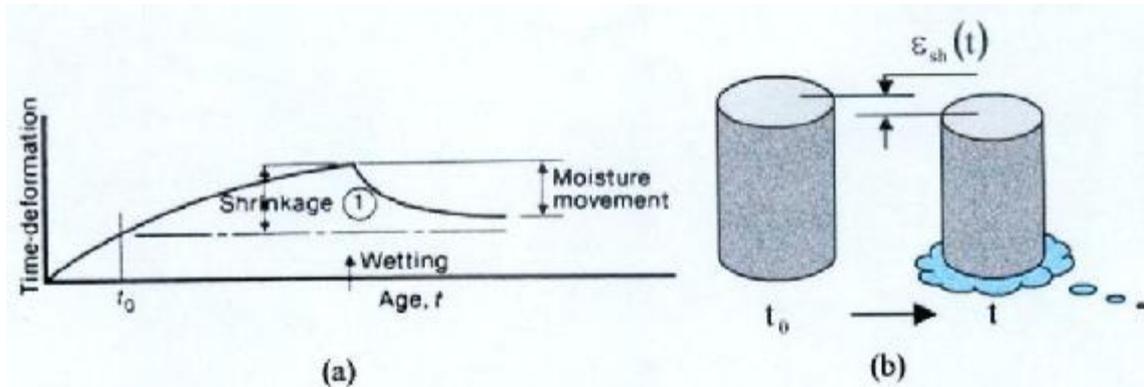


Fig : 2.1 (a) Déformation différée de retrait d'un spécimen non chargé : illustration de la cinétique de retrait (*shrinkage*) et, du gonflement (*wetting*) par variation hydrique (Neville & al. 1983) – (b) Variation volumique d'une éprouvette de béton au retrait.

Les différents retraits du béton.

2.2.1 Retraits au très jeune âge

Au moment du mélange du ciment avec l'eau, le retrait d'hydratation ou retrait chimique (à ne pas confondre avec le retrait hydraulique, ni avec le retrait de dessiccation) se produit par contraction, c'est pourquoi, d'autres auteurs le nommeront "retrait de serrage avant prise" [46]. Ce premier retrait, mis en évidence par [44] d'où la dénomination "Contraction de le Châtelier", résulte d'une diminution du volume (8 à 12 % du volume initial) de la pâte formée par rapport à la somme des volumes absolus des anhydres et de l'eau [47].

Avant la prise de la pâte de ciment, il est possible d'observer un retrait d'évaporation ou retrait plastique [45]. La limitation de ce retrait est souhaitée par des solutions de cure pour éviter une perte en eau excessive conduisant au phénomène pathologique de ressuage et à un arrêt prématuré de l'hydratation. En conséquence, une faible résistance du béton et une durabilité limitée à long terme seraient obtenues [48]. Ce

sylogisme est évidemment une source de fissuration excessive au sein du matériau car l'amplitude du retrait plastique est très importante comparée à celle du retrait hydraulique ou (retrait endogène) et dépend de la géométrie de l'ouvrage [45]. C'est le problème des bétons mis en place longtemps après gâchage et qui possèdent un retardateur de prise. La durabilité de ce type de béton est largement moins importante devant celle d'un béton gâché et mis en place immédiatement.

2.2.2 Retrait endogène

Après la phase d'hydratation, le mélange «**eau-ciment**» à l'état de suspension se raidit. C'est la prise. Il se constitue une étroite où les particules de ciment se soudent, formant entre eux des ponts cristallins (fig. 2.2 (a)). Cette étape coïncide avec le début du retrait hydraulique ou plus communément «**retrait endogène**», même si de nombreux hydrates de ciment ont déjà été formés dès le mélange [49].

Ce retrait est aussi qualifié de retrait d'auto-dessiccation. En effet, le squelette minéral formé après la prise s'oppose à la diminution de volume de l'hydratation croissante au sein de la pâte de ciment. La mise en pression du système cristallin conduit à la cavitation des pores et à un dégagement gazeux analogue à un départ d'eau.

Le retrait endogène est également influencé par le nombre et le type d'agrégats car, à l'interface «**pâte-granulat**», il est empêché par des granulats qui créent des zones de concentration de contraintes où vont se former les premières fissures (fig. 2. 2 (a) et (b)) [50], [51]. Un béton de calcaires concassés donnera un plus fort retrait qu'un béton de granulats quartzeux ou granulats roulés [48]. Enfin, un ratio E/C plus faible produit un retrait endogène plus important [52].

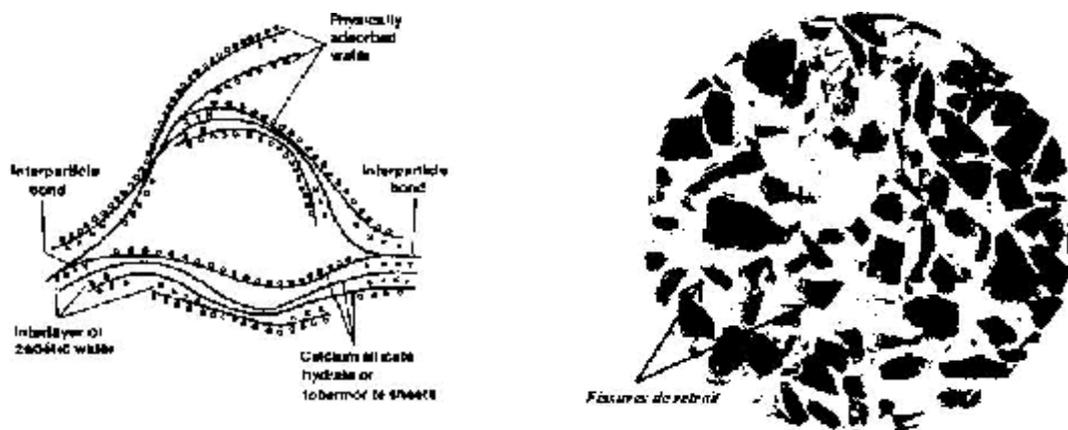


Fig : 2.2 (a) Ponts cristallins (*interparticle bond*) lors de la prise (Neville & al. 1983)

(b) Localisation des fissures de retrait sur la coupe d'une éprouvette (Folliot. A & al 1995)

Le retrait endogène est un des processus intrinsèques du béton car il ne dépend que des propriétés du matériau [53]. Par exemple, les composés du ciment C3S et en particulier, C3A, provoquent d'importants dégagements de chaleur lors de l'hydratation. Ils accélèrent le retrait dont on peut diminuer l'amplitude en réduisant principalement la teneur en C3A.

Nous établirons un descriptif des déformations endogènes, avec un répertoire de leurs causes possibles.

La première déformation endogène, celle qui se manifeste immédiatement après la mise en place du béton dans les coffrages est «**le tassement vertical**», accompagné de «**ressuage**» : ressuage et le tassement sont les deux aspects d'un même phénomène. En pratique, le tassement du béton frais dans les coffrages peut provoquer des fissures autant et parfois plus que les autres déformations ; pour les fissures les plus précoces, il est même souvent difficile de faire la part du tassement et de dessiccation. Mais le mécanisme de ce tassement est très différent de celui des autres déformations endogènes ; il s'apparente à une percolation de l'eau à travers la suspension faiblement floculée des grains de ciment [54].

- **Ressuage**

On sait que la pâte de ciment fraîche pouvait être considérée comme un ensemble de grains plus ou moins floculés en suspension dans l'eau. Si la quantité d'eau est faible, cette suspension est très concentrée (les grains sont très proches les un aux autres) l'ensemble est très peu déformable sous l'action des seules forces de gravité. En revanche, lorsqu'il y a un excès d'eau, le squelette formé par les grains de ciment a tendance à se tasser sous l'effet de la pesanteur ; au cours du temps, l'eau, plus légère que les grains de ciment, migre vers le haut et l'on peut voir apparaître à la surface de la pâte une mince pellicule d'eau qui explique le nom de ressuage donnée au phénomène (fig. 2.3).

Etant dû aux forces de gravité, le ressuage est unidirectionnel : c'est un tassement, vers le bas, des éléments solides de la pâte ; en cela il se distingue des déformations étudiées dans les paragraphes qui suit.

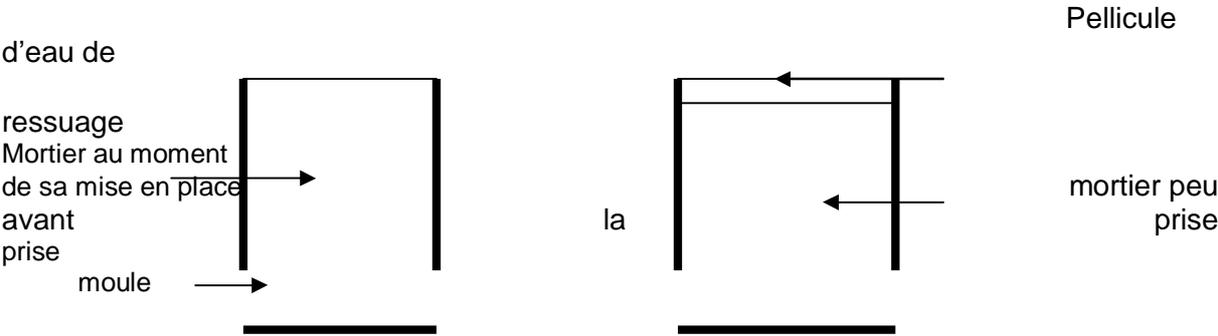


Fig : 2.3 Phénomène du ressuage

Lorsqu'on mesure la déformation d'une éprouvette suivant une direction horizontale, on s'affranchit du même coup de tassement (qui, étant un effet de pesanteur, est seulement vertical). On obtient alors la courbe représentée sur la (fig. 2.4). On distingue sur cette courbe trois stades de déformation :

- un premier retrait
- un gonflement
- un second retrait.

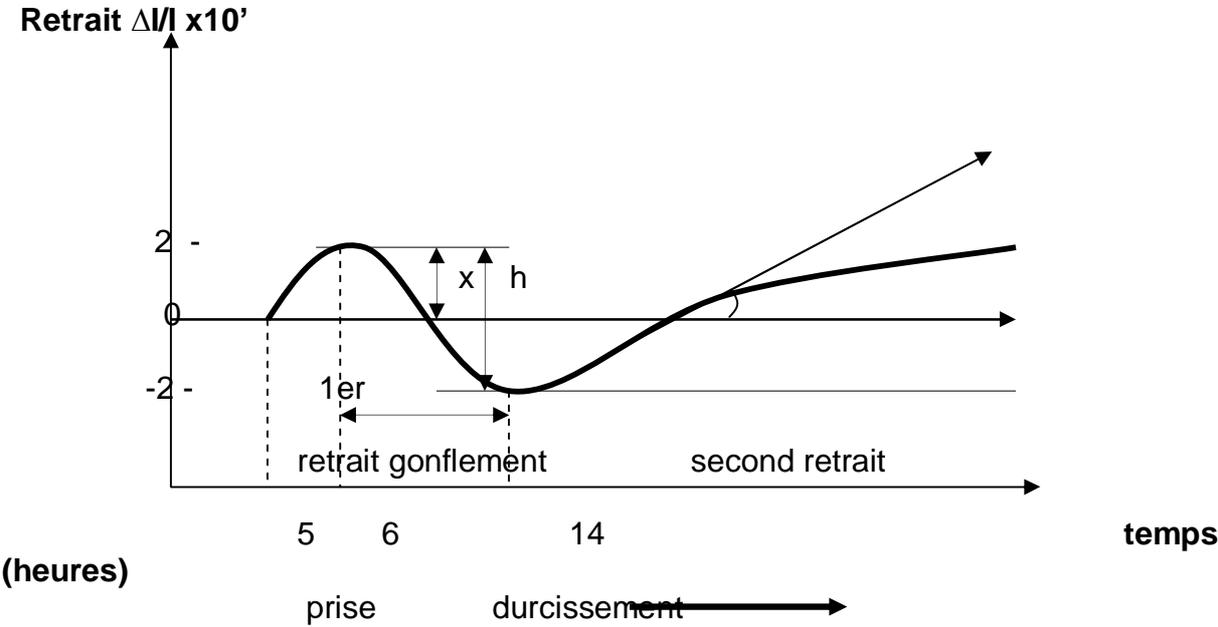


Fig : 2.4 Déformation endogène de la pâte de ciment vieillissante (aucun échange d'eau avec l'extérieur).

Les retraits sont comptés positivement ; l'origine des temps correspond à la fin du malaxage, les ordres de grandeur donnés sur les axes (retrait et temps) sont

seulement indicatifs. Les limites verticales séparent les trois stades de la déformations qui sont : premier retrait, gonflement, second retrait.

A/ Le premier retrait.

Le premier retrait commence à peu près en même temps que la prise (du moins à 20°C) soit, typiquement 1 à 3 heures après la fin du malaxage. Il dure de 2 à 3 heures (la durée est donnée à titre indicatif, sont bien représentatives des ciments courants ; elles peuvent cependant être changées du tout au tout par l'ajout d'adjuvants et notamment d'accélérateurs ou de ralentisseurs de prise). La valeur maximale du premier retrait dépend de la composition du ciment ; pour certains ciments contenant peu d'aluminate tricalcique C_3A , on'observe aucun premier retrait mais plutôt, dès le départ un gonflement. Le premier retrait peut atteindre 6.10^{-4} dans le cas extrême d'un ciment contenant 15% de C_3A et riche en alcalis (Na_2O ET K_2O), le rapport E/C étant égal à 0.3. Il semble que la valeur maximale du premier retrait augmente lorsque le rapport E/C diminue [55] ; elle reste cependant assez faible si on l'a compare à celle du retrait dit «**plastique**» qui se produit à la même époque lorsque l'éprouvette peut sécher.

B/ Le gonflement.

La fin du premier retrait coïncide à peu près avec la fin de prise, en ce moment survient alors un gonflement dont la durée et l'amplitude varient beaucoup selon les ciments, même à l'intérieur d'une même classe de résistance. Pour certains ciments, riches en C_3A et sous dosés en en gypse, il peut n'y avoir aucun gonflement, à peine un ralentissement momentané du retrait ; parfois la période de gonflement existe mais elle est très courte (moins de 3 heures). Cependant, pour de nombreux ciments à 20°C, la période de gonflement dure entre 10 à 20 heures et le gonflement maximal est de l'ordre de 4.10^{-4} (pour E/C = 0.27). Le gonflement dépend de la quantité de chaux libre restant non hydratée à la fin de prise ; il augmente fortement avec la température. L'influence du dosage en eau (rapport E/C) reste à préciser.

C/ Le second retrait.

Il se manifeste après la fin de la prise ; à déformations empêchées égales, les contraintes en jeu sont donc beaucoup plus fortes pour le second retrait que pour le

premier. La valeur maximal du second retrait d'une pâte de ciment dont le rapport E/C est compris entre 0.25 et 0.3 peut atteindre $1.5 \cdot 10^{-3}$, ceci dans des conditions isothermes (20°C) et rappelons-le, en l'absence d'évaporation ; il faut attendre plusieurs jours, parfois 7 jours et plus, pour atteindre cette valeur maximal, la vitesse maximale de second retrait voir graphe varie considérablement suivant les ciments, même à l'intérieur d'une même classe de résistance. Pour E/C = 0.27, les valeurs s'étalent de 0.2 à $7 \cdot 10^{-5}$ par heure ; il semble que, finalement, plus le gonflement dure longtemps, plus la vitesse maximal de second retrait est plus faible ; cette vitesse augmente quand le rapport E/C diminue.

2.2.3 Causes du retrait endogène

Après description des trois phases de la déformation des pâtes de ciment vieillissantes, nous allons étudier les causes de ces phénomènes. On distingue trois mécanismes :

- Le retrait de dessiccation
- Le retrait thermique
- Le gonflement d'origine chimique

2.2.3.1 Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation ou retrait de séchage par définition, se traduit par un départ d'eau inhérent à l'équilibre hydrique du matériau avec l'atmosphère ambiante non saturée et ce, dès la mise en place du béton, cette contraction du volume absolu total (égal à 25% du volume de l'eau liée chimiquement) laisse en effet des vides à l'intérieur de la pâte. Il possède une amplitude très importante devant les autres retraits. La contraction produite permet l'évaporation de l'eau en excès, nécessaire uniquement au malaxage du béton frais et dépend donc de la teneur en eau initiale de la composition du béton. Cette auto dessiccation peut être mise en évidence expérimentale d'une façon directe (fig. 2.5). Après 10 jours d'hydratation, l'éprouvette est en équilibre avec une hygrométrie d'autant plus faible que le rapport E/C de la pâte de ciment est plus petit (tableau 2.1) [56].

Tableau 2.1 Hygrométrie d'une pâte de ciment en fonction de E/C

Rapport E/C de la pâte	0.40	0.30	0.25

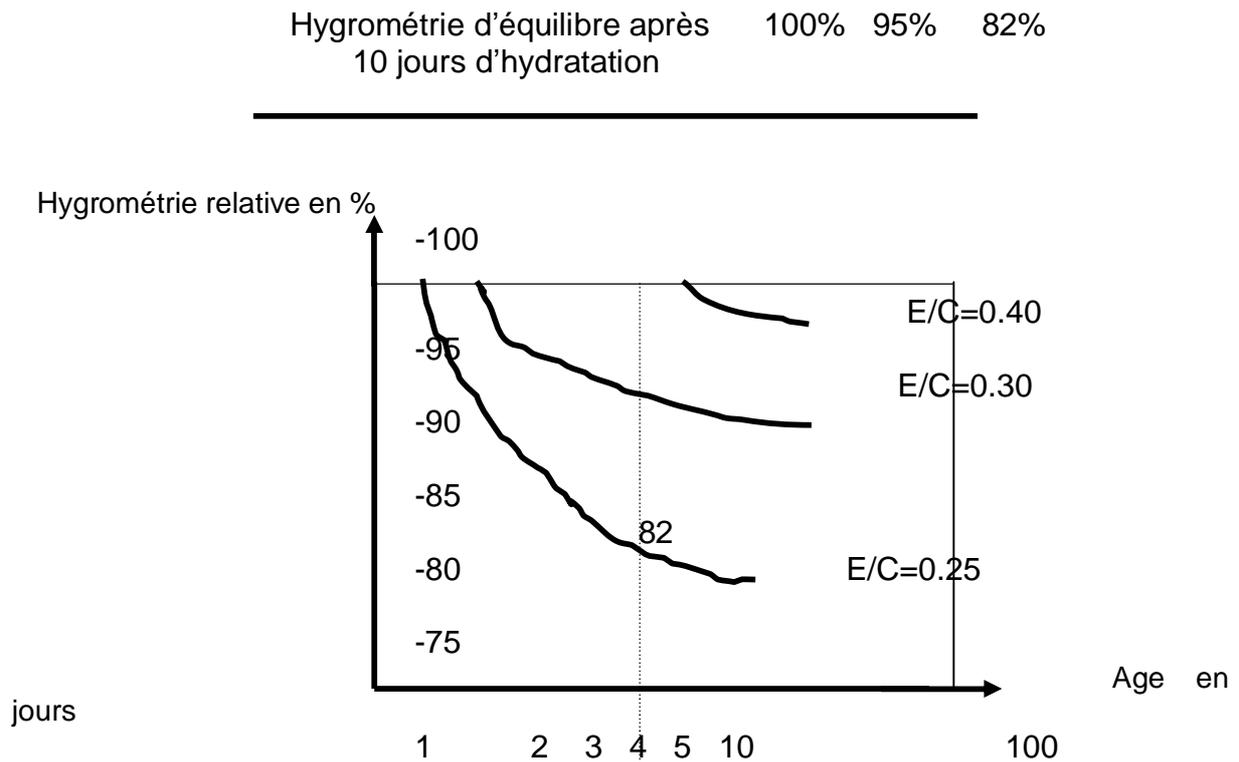


Fig: 2.5 Auto-dessiccation de la pâte de ciment en cours d'hydratation (Wittmann. F. H 1973)

On mesure l'hygrométrie relative dans une enceinte fermée de petite dimension, en équilibre avec l'éprouvette. Cette hygrométrie diminue progressivement au fur et à mesure que le ciment s'hydrate et d'autant plus que le rapport E/C de la pâte de ciment est plus petit.

On comprend pourquoi les valeurs maximales du premier retrait et de vitesse du second retrait augmentent quand le rapport E/C de la pâte de ciment diminue ; c'est la conséquence d'une auto-dessiccation plus forte.

Le retrait de séchage est notamment diminué si la proportion "granulats / pâte de ciment" augmente [58]. Ce retrait hydrique n'est pas un processus intrinsèque du béton car les transferts hydriques du cœur de l'élément vers l'extérieur, amènent à considérer la taille et la géométrie des éléments [53]. En particulier, de forts gradients hydriques sont maintenus longtemps au voisinage de la surface [47].

Le retrait de dessiccation dépend fortement de l'environnement hygrométrique et de ses variations (conditions de conservation) qui intervienne sur l'accélération ou le ralentissement du séchage. Selon le matériau et son épaisseur, le séchage peut prendre fin au bout de quelques années (structures massives) [47] ; [59]. Pour les structures de faibles épaisseurs, le changement brusque d'ambiance par ré-

humudification ou séchage intense conduit à un endommagement du matériau en générant des efforts de traction trop importants devant la résistance effective du béton [60].

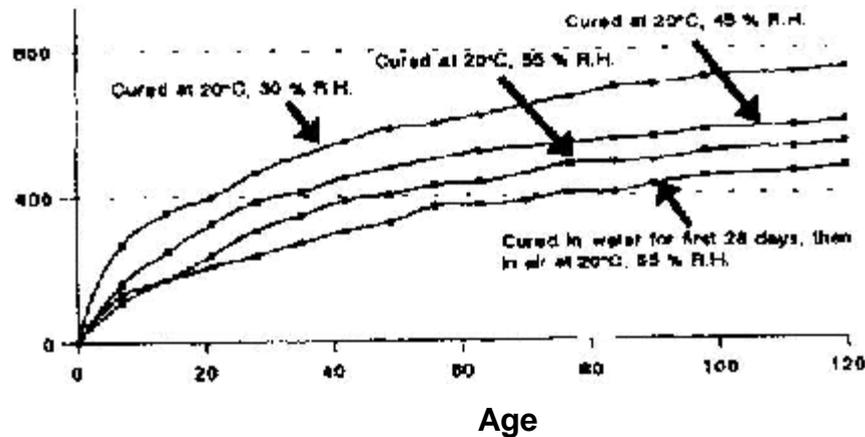


Fig : 2.6 Variation du retrait en fonction de l'humidité relative (RH%) (Mangat et Limbachiya. 1997).

2.2.3.2 Retrait thermique

Les réactions d'hydratation peuvent devenir fortement exothermique et provoquer de forts gradients de température. La vitesse de dégagement de chaleur augmente au début "période de prise" puis diminue ensuite. De ce fait, même si la température extérieure est constante, le béton ou la pâte de ciment manifestent en général, au cours de l'hydratation, une déformation d'origine thermique : une expansion suivie d'une contraction. Au cœur d'éléments massifs de structure, la température peut atteindre 50 à 70 °C. Par conséquent, des retraits différentiels d'origine thermique vont s'ajouter pour obtenir l'équilibre de l'élément avec les températures du milieu environnant [45], [46], [47].

L'élévation de température puis le refroidissement peuvent maintenant être commodément calculés à l'aide de programmes numériques connaissant : la conductibilité thermique du béton (1 kcal/m.h.°C environ, cette conductibilité dépend notamment du degré de dessiccation interne), la vitesse de dégagement de chaleur d'hydratation en fonction du temps, la capacité calorifique (0.2 kcal/kg) ; le résultat trouvé dépend évidemment de la taille, de la forme de la pièce et des conditions

thermiques imposées aux limites. Cette élévation de température peut atteindre 10°C et plus dans les pièces massives (dalles routières, talons de poutres) voir 30°C dans les barrages. Le refroidissement est d'autant plus rapide que la pièce est plus mince : il coïncide souvent avec un second retrait par auto-dessiccation important (en laboratoire, il est évidemment possible de séparer les deux phénomènes, en travaillant dans des conditions isothermes).

2.2.3.3 Le gonflement d'origine chimique

Ce gonflement qui se manifeste au cours de l'hydratation de nombreux ciments courants est surtout lié à la déformation "d'ettringite" c'est ce gonflement que l'on accentue lorsqu'on cherche à compenser le retrait (ciments expansifs ou retrait compensé). Ses causes sont aujourd'hui mal connues, on tend à abandonner l'hypothèse d'une poussée cristalline directe au profit d'autres mécanismes comme :

- Une conversion de l'ettringite (qui est un trisulfate) en monosulfite.
- Une formation d'ettringite colloïdale avec répulsion électrique entre les "micelles".
- Une pression osmotique (résultant d'une différence de concentration en sels entre les parties proches et lointaines du grain anhydre).

Il n'y a aucune raison de penser que le gonflement d'origine chimique cesse de se manifester au moment où l'on mesure un retrait (le second retrait) ; il est probable au contraire que la déformation mesurée soit la superposition d'un gonflement et d'un retrait, le gonflement l'emportant au début et le retrait après.

Le tableau 2.2 propose, pour conclure cette partie, une synthèse des déformations observées et des mécanismes possibles.

Tableau 2.2 Mécanisme de la déformation endogène de la pâte de ciment

Periode	Prise	Durcissement	
Phénomènes	1 ^{er} retrait	Gonflement	2 ^{ème}
retrait Mécanismes			
Auto-dessiccation □□		□□	■
Déformation thermique □□●			■

Formation d'ettringite



- ■ Mécanisme prépondérant
- Mécanisme secondaire
- L'importance dépend de la forme et de la taille de la pièce

On peut évidemment se poser la question si les trois mécanismes exposés sont les seuls en jeu; on peut le vérifier en étudiant la déformation isotherme d'un ciment peu gonflant; d'après le tableau ci-dessus, le seul mécanisme qui reste en jeu est le retrait par auto-dessiccation. On vérifie expérimentalement qu'il en est bien ainsi en comparant au même âge :

- La déformation endogène pour une concentration Le Chatelier unité.
- Le retrait par dessiccation pour une perte en poids unité.

Ces deux valeurs sont du même ordre [61], [62].

Lorsqu'on conserve la pâte de ciment sous l'eau, de manière à ce que l'eau puisse pénétrer dans ses capillaires, on empêche ainsi, en principe, l'auto-dessiccation. On observe alors un gonflement qui se poursuit même après 1000 jours d'hydratation et peut atteindre 0.2%

(fig. 2.7). Au cours des tous premiers jours, une part de ce gonflement d'origine chimique est due notamment à la formation d'ettringite; le gonflement à long terme, par contre, est lié à la structure de la pâte par l'hydratation et, en particulier, à l'accroissement considérable des surfaces spécifiques.

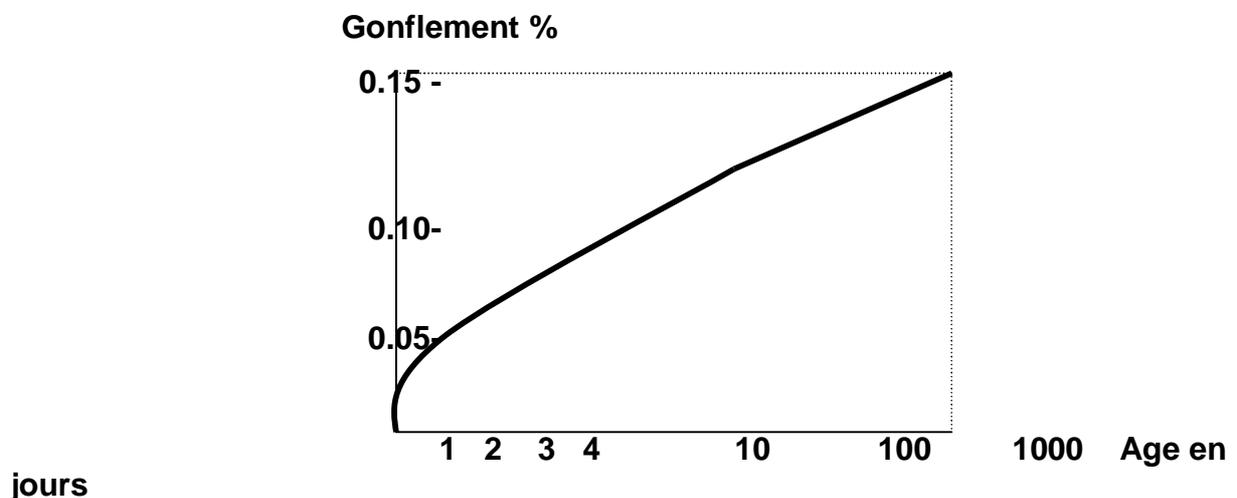


Fig : 2.7 Gonflement d'une éprouvette de pâte de ciment conservée sous l'eau à 20°C

(E/C=0.25), d'après (L'Hermite & Al. 1960)

2.2.4 Retrait hygrométrique

On mesure le retrait hygrométrique à âge constant en desséchant l'éprouvette suffisamment vite pour que la pâte de ciment n'ait pas le temps de vieillir notablement (l'avancement des réactions d'hydratation en cours de dessiccation est négligeable). Une pâte âgée de 7 jours, par exemple, devra être desséchée en quelques heures ; une autre, âgée de 27 heures, en quelques dizaines de minutes ; une dessiccation aussi rapide n'est pas possible que si l'éprouvette est mince (quelques millimètres). Plusieurs expériences ont été mesurées dans ces conditions [62], [63].

Si la pâte de ciment n'a pas le temps de vieillir, elle se comporte dans ces expériences comme un matériau poreux mais chimiquement inerte.

Dans ces expériences, il n'est pas possible de rapporter la valeur du retrait à celle de l'hygrométrie d'équilibre ; la dessiccation est en effet beaucoup trop rapide pour qu'il y ait équilibre à chaque instant entre l'eau interne et la vapeur d'eau de l'atmosphère ambiante. On doit donc se contenter de rapporter la valeur du retrait à la quantité d'eau évaporée (ou la perte en poids de l'éprouvette). Le résultat le plus marquant est alors celui-ci :

Pour toutes les pâtes de ciments, quels que soit leur âge et leur rapport E/C (poids de l'eau rapporté au poids du ciment), on distingue deux stades successifs de retrait nettement tranchés (fig. 2.8).

Nous désignerons ces deux stades par "retrait A" et "retrait B".

On sait que les trous de la pâte de ciment sont répartis entre deux familles : **les capillaires**, vestiges de la structure de la suspension des grains de ciment dans l'eau, et **les pores**, caractéristiques des amas d'hydrates formés.

Il est naturel de penser que :

- Le stade A du retrait résulte du départ de l'eau des capillaires.
- Le stade B du retrait résulte du départ de l'eau des pores.

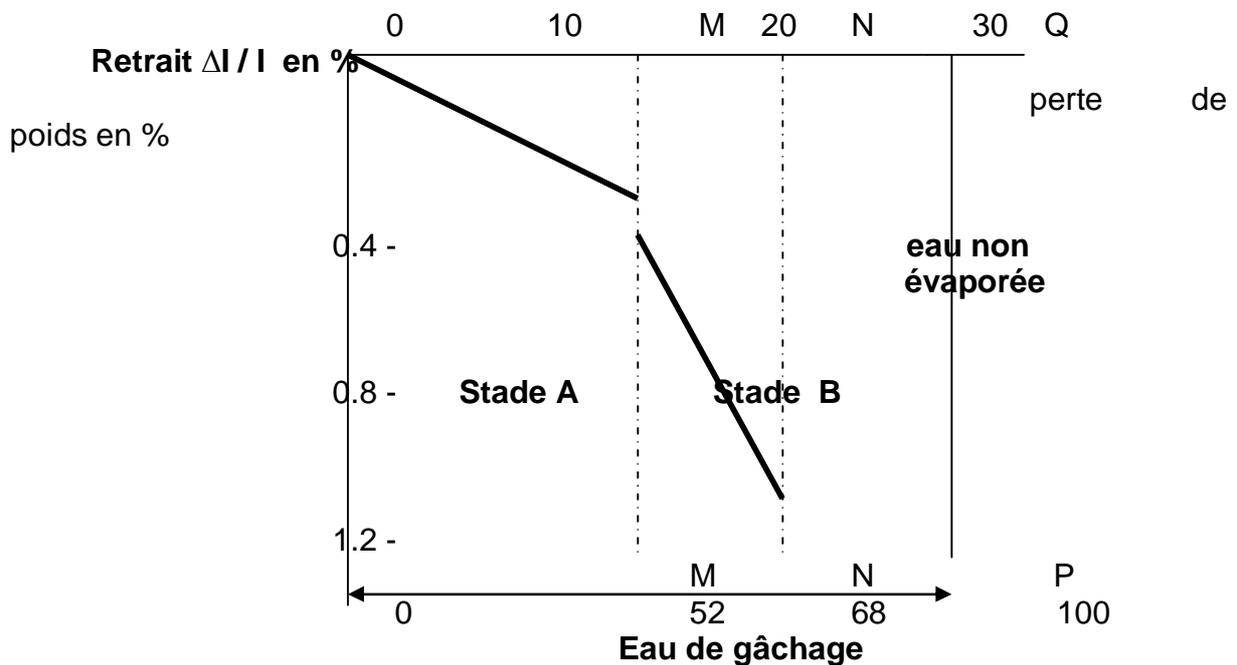


Fig : 2.8 Accroissement de retrait en fonction de la perte en poids (Verbeck.1968)

Pâte âgée de 7 jours, E/C =0.5

La courbe représente la variation du retrait, et se compose de deux tronçons ; le premier tronçon passant par l'origine, correspond au stade A du retrait, le second tronçon correspond au stade B du retrait. L'abscisse du trait vertical QP correspond à la quantité d'eau de gâchage. L'eau dans la pâte peut être répartie entre les segments **OM**, **MN**, **NQ**.

NQ fraction d'eau non évaporée (32% de l'eau de gâchage dans les conditions d'essai)

OM fraction d'eau dont le départ donne 52% de l'eau de gâchage lieu au retrait A

MN fraction d'eau dont le départ donne 16% de l'eau de gâchage lieu au retrait B

Pour exprimer commodément les résultats expérimentaux, nous définirons le "**taux de retrait T**"

$$T = \frac{\text{Accroissement de retrait}}{\text{Accroissement de perte en poids \%}}$$

T est la pente en tout point des courbes de la figure 2.8 et la figure 2.9

Description des deux stades de retrait :

*** Stade A du retrait**

En considérant une éprouvette de pâte de ciment d'âge donné. D'après [20], le taux de retrait augmente au fur et à mesure que l'éprouvette se dessèche (fig. 3.9) ; cela tient à ce que l'eau restante est située dans des capillaires de plus en plus fins. Ce résultat n'est pas confirmé par quelques recherches.

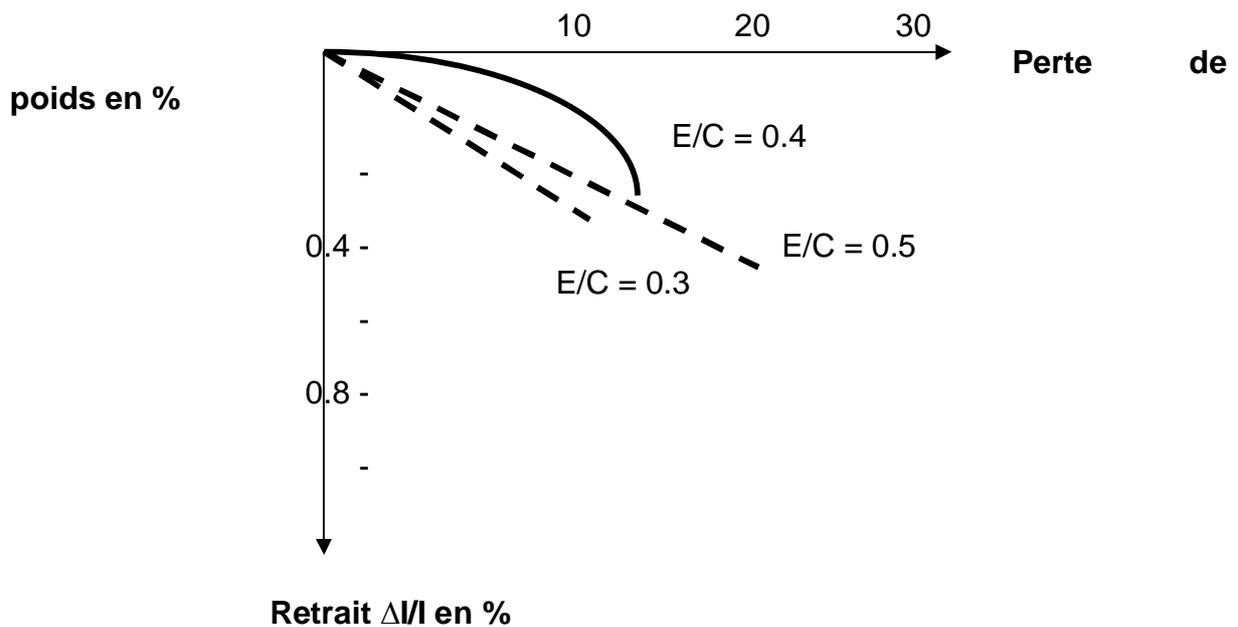


Fig : 2.9 Stade A du retrait pour une pâte âgée de 28 jours

La courbe en trait plein est celle obtenue par [62] pour une pâte de ciment dont le rapport E/C est 0.4. On a porté en trait interrompu les courbes obtenues par [63] pour deux pâtes de ciment dont le rapport E/C est égal à 0.3 et 0.5 ; ce sont approximativement deux droites passant par l'origine (taux de retrait constant pendant toute la dessiccation). On observe un assez bon accord entre les résultats que ce soit pour la valeur du retrait A final ou pour la quantité d'eau évaporée à la fin du retrait A.

Afin d'affranchir le différent constaté, nous devons définir le "taux de retrait A moyen T_a " :

$$T_a = \frac{\text{Retrait A total}}{\text{Perte de poids}} \text{ en } \%$$

perte en poids à la fin du retrait A

Le taux retrait A moyen augmente avec l'âge de la pâte de ciment (fig. 2.10) ; cela peut être mis en relation avec la diminution du rayon du capillaire moyen au fur et à mesure de l'hydratation ; les capillaires sont progressivement envahis par les amas d'hydrates formés. A un âge égal, le taux de retrait A moyen ne dépend pas du rapport E/C de la pâte de ciment si celui-ci est supérieur à 0.5 ; en deçà de 0.5, il augmente lorsque E/C diminue (fig. 3.10). Ce résultat n'est que partiellement en accord avec ce que l'on connaît de la structure des pâtes :

A un âge donné, la dimension du capillaire moyen est d'autant plus grande que E/C est plus grand mais cela reste vrai que si E/C soit supérieur ou inférieur à 0.5.

Taux de retrait A moyen (x 10')

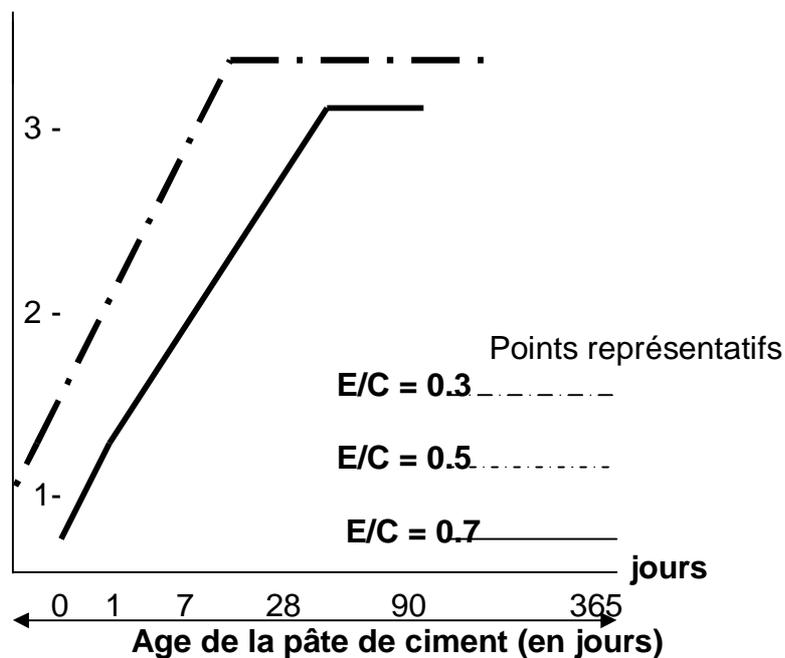


Fig : 2.10 Variation du taux de retrait A moyen en fonction de l'âge de la pâte de ciment (Verbeck. 1968)

Le taux de retrait A augmente avec l'âge de la pâte de ciment ; il atteint une valeur stationnaire vers 90 jours.

Les courbes représentatives des pâtes ayant un E/C de 0.5 et de 0.7 sont confondues (courbe en trait plein).

La courbe en traits interrompus, correspondant à la pâte de ciment dont E/C est 0.3, est située au dessus de la courbe précédente.

Donc le résumé est : lorsqu'on compare des pâtes de ciment différent par l'âge ou par le rapport E/C, on constate que le taux de retrait moyen est d'autant plus grand que le rayon des capillaires est petit.

2.2.5 Paramètre influant sur le retrait.

Le retrait est dû à l'évaporation de l'eau qui imprègne la masse du mortier ou béton. La sécheresse à quelque cause qu'elle soit due, en est la raison déterminante. Deux conditions s'imposent donc pour limiter le retrait : l'utilisation minimum d'eau de gâchage et, ensuite, pendant et après la prise, protection contre la dessiccation.

Ces deux principes se trouvent être précisément ceux dont l'application assure au mortier et béton le maximum de résistance. Il y a ainsi double avantage à s'y conformer.

A travers notre recherche nous avons sélectionné quelques causes déterminantes :

▀ Les causes dues au liant sont sa composition chimique et physique et son état de conservation.

Pour les ciments de même nature, l'eau de gâchage et, par conséquent, le retrait augmente avec la finesse de mouture. En pâte pure, un artificiel normal a un retrait de 0.3 mm par mètre à 1 jour et 2.2 mm par mètre à un an ; pour un super-ciment à fine mouture, dans les mêmes conditions de conservation, il est de 1 et 3.7 aux mêmes périodes.

Les ciments alumineux, métallurgiques et naturels prennent plus de retrait que les artificiels. Certains chercheurs ont supposé que la teneur en alumine avait une influence, mais cette hypothèse n'a pu être vérifiée.

▀ Les causes dues au béton et à ses constituants sont, le dosage en liant, la nature et la granulométrie des granulats, la consistance, le mode de mise en œuvre, les produits d'addition.

Le retrait augmente avec la richesse en ciment.

Pour un mortier à base de sable de rivière, à 300 jours, il est de :

- 0.60 pour 20% de ciment et 80% de sable.

- 0.85 pour 27% de ciment et 73% de sable.
- 0.98 pour 35% de ciment et 65% de sable.
- 1.27 pour 50% de ciment et 50% de sable.
- 1.64 pour 75% de ciment et 25% de sable.
- 1.97 pour la pâte de ciment pur.

A même granulométrie, les granulats concassés provoquent un retrait plus élevé que les matériaux roulés. L'excès d'éléments fins, la diminution de la grosseur maximum ont la même action, ainsi que toutes les causes tendant à augmenter l'eau. A300 jours, le retrait du béton à 350 kg passe de 0.51 à 0.63 suivant qu'il est gâché avec 235 ou 266 litres d'eau.

La ségrégation au cours de la mise en œuvre, soit dans le transport, soit par un lissage trop poussée, provoque une remontée de laitance qui amène du faïençage. Presque toutes les matières d'addition sont à proscrire (expulser). Certains produits comme l'huile, la paraffine, le savon et certains sels hygroscopiques diminuent en principe le retrait, mais le résultat est illusoire car les résistances sont sérieusement compromises et ne peuvent être récupérées que par une forte augmentation du dosage ; le chlorure de calcium a en outre, l'inconvénient de modifier la durée de prise et de provoquer des efflorescences. Les sels contenus dans l'eau de gâchage, les substances colloïdales, la présence du gaz carbonique sont également néfastes. Le retrait peut, dans certains cas, passer du simple au triple. Aucun produit ne doit être employé sans essais préalables.

▣ Les causes du retrait aux circonstances indépendantes sont la température, la forme et la dimension des pièces, la contrainte, la proportion d'armatures et surtout l'état d'humidité du milieu de conservation.

L'action de la température est complexe. Le béton ou le mortier comme tout les corps subit d'une part l'effet de la dilatation calorifique, d'autre part, les variations thermiques de l'atmosphère entraînent une modification de la concentration en vapeur d'eau.

Si par exemple la température s'élève, l'atmosphère devient plus sèche et provoque un certain retrait, mais il est balancé par la dilatation calorifique, dont l'indice est voisin de $1/10^5$.

La variation réelle dépend de la grosseur des pièces, de la soudaineté et de la persistance de l'écart thermique.

Le béton ou le mortier mauvais conducteur de chaleur, est d'autant plus réfractaire aux influences extérieures que son volume est plus important.

Cela est particulièrement sensible dans les barrages où les masses journalièrement mises en œuvres ne permettent pas à la chaleur provoquée par la prise du ciment de se dégager. L'ouvrage une fois terminé, l'écart entre les parois et le cœur de la masse peut atteindre plusieurs dizaines de degrés. Le refroidissement extrêmement brut, provoque des tensions internes hautement préjudiciable. On a tenté d'y parer par divers expédients : circulation d'eau à tubes perdus et surtout emploi de bétons maigres. On est même allé, aux Etats-Unis, jusqu'à construire des usines fabriquant un ciment spécial à faible chaleur d'hydratation.

Le retrait en ce cas est purement thermique, sauf au voisinage des parois soumises aux intempéries.

Au contraire, dans les ouvrages présentant une grande surface par rapport au volume, les causes atmosphériques du retrait sont très influentes : les terrasses, planchers et toutes aires, et particulièrement les routes constituant des masses faible épaisseur sous de grandes étendues. La pratique a d'ailleurs fait adopter de distance en distance des coupures que l'on colmate avec des matériaux plastiques.

Le béton armé, lui aussi, se présente généralement sous forme de pièces longues par rapport à la section, mais dans ce cas, les armatures jouent un rôle modérateur du retrait. L'acier a une excellente adhérence au béton et s'oppose aux variations de longueur en exerçant une contrainte uniformément répartie.

Cet effet dépend évidemment du mode de ferrailage si les barres d'acier ne sont pas disposées que d'un seul côté, les pièces peuvent présenter une courbure qui n'est pas négligeable.

Pour 5% d'armature, le retrait peut tomber à 1/ 5 de sa valeur. Le béton armé n'est d'ailleurs qu'une face du problème des contraintes.

La cause de retrait la plus importante pour un mortier ou un béton ayant fait prise est son mode de conservation.

Les liants se comportent très différemment suivant l'époque à laquelle on les expose à l'air et suivant l'état d'humidité de cet air. Si l'atmosphère est très sèche ou très humide, il faut mouiller le béton ou le mortier le plus longtemps possible, aux moyennes hygrométriques, cela présente moins d'importance. Si au contraire, on immerge un béton ayant durci à l'air, il ne reprend pas forcément sa longueur primitive. Cette différence est d'autant plus grande que le premier retrait était plus faible. Son maximum est atteint avec un premier durcissement dans une atmosphère à environ 60% d'humidité.

A titre d'exemple, nous citerons l'expérience suivante de (M. Lucas) il a confectionné un certain nombre d'éprouvette ; une quantité a été conservée 50 jours dans des atmosphères plus ou moins humides, puis mises à l'eau pendant un temps égal «série : air-eau». Le restant a été immergé pendant 50 jours, puis mis à l'air autant de temps et enfin remis à l'eau pendant 3 mois «série : eau- air-eau».

Le tableau ci-dessous indique les différentes variations de longueurs en millimètres par mètre, les nombres négatifs correspondent à des allongements.

Tableau. 2.3 : retrait d'éprouvettes exposées à deux séries de mode de conservation					
Humidité de résiduel L'air % mois à	Série Air-Eau		Série Eau-Air-Eau		
	Retrait après 50 jours à l'air	Retrait résiduel après 50 jours à l'eau	Retrait après 50 jours à l'air	Retrait après 3 l'eau	
100	- 0.7	-0.8	-1.0	-1.1	
96	0	-0.4	-	-	
90	-	-	0	-0.6	
80	1	0.2	0.4	-0.5	
60	1.8	0.6	1.4	-0.4	
50	1.9	0.5	-	-	
40	1.85	0	2.25	-0.6	
25	1.75	-0.35	-	-	
20	-	-	2.65	-0.7	
10	2	-0.25	-	-	
4	3	-0.15	-	-	
Presque nulle 0.7	4	0	3.4		

Tous les liants offrent ces variantes, si non de même valeur, du moins de même allure. Les représentations graphiques d'essais faits dans les mêmes conditions affectent toute la forme d'un S incliné, d'autant plus renflé que le liant est au moins résistant. L'exemple ci-dessus révèle la nécessité de combattre la déshydratation du béton dans son premier âge.

Comme on peut en juger, les causes de retrait sont multiples. Chaque influence pouvant modifier profondément les résultats, tous les exemples cités dans cette étude n'ont qu'une valeur relative. Seule une expérimentation directe permet d'acquérir les données certaines.

Pour fixer un ordre de grandeur, nous reproduisons les résultats moyens obtenus par les expériences de M. Lucas sur des bétons et mortiers exécutés avec 6 ciments différents et ayant les mêmes caractéristiques suivantes :

Les éprouvettes conservées à l'eau pendant 30 mois n'ont guère varié de longueur. D'autres, conservées dans une chambre à ambiance constante à 70% d'hygrométrie et 18°C de température, ont pris un retrait qui a atteint les valeurs suivantes :

Tableau. 2.4 : retrait d'éprouvettes conservées au mode ambiant					
mois	3 jours	7 jours	1 mois	6 mois	30
Retrait	0.04	0.13	0.25	0.35	0.45

Il y a peu de différence d'un ciment artificiel à un autre. Un ciment de laitier et un pouzzolanique ont donné des retraits plus forts d'un quart environ.

Pour une pâte pure, gâchée à consistance plastique, le retrait est environ trois fois plus fort.

La loi de variation dans le temps est la même que pour le béton, elle suit à peu près l'élévation de résistance.

Ce rappel nous a permis d'exposer les travaux antérieurs concernant les paramètres influant sur le retrait et d'avoir une idée bien précise.

Les retraits des bétons sont de deux origines :

- **Retrait endogène** : il est lié aux modifications de la structure de la pâte de ciment vieillissant (hydratation, carbonatation). C'est la déformation d'un matériau vieillissant en passant par la prise et le durcissement, sans échange d'eau avec l'extérieur.
- **Retrait de dessiccation** : il est lié aux mouvements de l'eau entre le béton et le milieu extérieur (séchage ou humidification) et peut même se manifester dans le cas d'une redistribution hygrométrique à l'intérieur d'une pièce sans qu'il y ait pour autant un échange avec l'extérieur.

Ces deux phénomènes de retrait influent l'un sur l'autre et chacun dépend de différents facteurs.

Dans le cas où il y a combinaison des deux phénomènes, retrait de dessiccation et retrait endogène, il est pas juste de considérer que la déformation globale d'une pièce de béton qui s'hydrate en séchant est la somme des deux retraits [64], [67].

En effet, le séchage modifie la valeur de la déformation endogène pour au moins deux raison :

- Il change la cinétique des réactions d'hydratation. On sait que l'hydratation s'arrête à une certaine valeur d'hygrométrie (environ 80%).
- Il diminue le gonflement d'origine chimique. C'est d'ailleurs une des difficultés rencontrées lors de l'utilisation des ciments expansifs.

L'interaction entre l'hydratation et la dessiccation peut avoir un effet sur les déformations juste après la prise. D'après [47], en absence de séchage de béton, on n'observe aucun retrait car le retrait d'hydratation est négligeable après une semaine d'âge. Le retrait endogène est d'environ 20 fois plus petit que le retrait hygrométrique à 5 jours et une éprouvette immergée dans l'eau a un gonflement 10 fois plus petit (en valeur absolue) que le retrait dû au séchage.

Les transformations chimiques que subies la pâte de ciment engendre des vides très fins (micropores) de l'ordre de $0.01\mu\text{m}$ dans les hydrates. Ces fines porosités diminuent avec l'évolution de l'hydratation car les vides sont comblés par les microcristaux. L'eau interne de la pâte de ciment est plus ou moins liée au solide. L'énergie de cette liaison engendre des contractions dans les espaces intergranulaires, ces mouvements provoquent un retrait. La vapeur d'eau dans les

capillaires tendent à se mettre en équilibre avec l'humidité relative de l'atmosphère [47], [65].

Lorsque l'on doit tenir compte du retrait d'un béton, il est possible d'utiliser des recommandations (normes) qui utilisent des approximations (grossières), soit effectuer des mesures, ce qui nécessite un grand effort et souvent beaucoup de temps. Si l'on mesure le retrait sur des éprouvettes de dimensions relativement petites et ceci pendant une période de temps de l'ordre d'une année, on constate que le retrait mesuré est déjà plus grand que celui admis pour un temps infini dans différentes normes sans prise en compte de lois de simulation du comportement réel [66]. Le fait que le retrait indiqué dans les normes sous-estime le comportement réel peut être expliqué, du moins partiellement, par les erreurs découlant des extrapolations.

Dans la littérature, on trouve de nombreux modèles pour décrire le retrait. Souvent des séries de mesure ont été effectuées afin de valider tel modèle ou de vérifier un ou plusieurs paramètres.

Dans cette étude, nous ne proposons pas de nouveau modèle, mais nous confrontons nos résultats à ceux déduits des prévisions d'autres recherches.

Dans ce chapitre, on a voulu contribuer à l'étude du phénomène de retrait en entamant un important programme expérimental qui englobe l'étude de l'influence de trois paramètres importants retenus de la recherche bibliographique, sur la mesure du retrait, la perte en poids de mortier et quelques aspects de durabilité.

Conformément aux recommandations, dans nos essais, la mesure 24 heures après coulage sert de référence. Ainsi, sur les courbes apparaît notamment au jeune âge une superposition du retrait endogène et du retrait de dessiccation.

Dans cette étude, une évaluation de la performance à moyen et long-terme est présentée pour les différents types de mortiers. Deux types de fibres, avec un pourcentage de volume de (1%, 2%) et une longueur de (10 mm) pour les fibres copeaux, de (50mm) pour les fibres industrielles, utilisant une même composition de base pour tous les mortiers (voir chapitre précédent : matériaux), sont comparés.

Le but de cette recherche est de :

a) – Fournir des informations sur les caractéristiques du retrait du béton renforcé de fibres métalliques.

b) – Evaluer une théorie qui traduit le comportement du matériau composite en fonction du temps à charge nulle (retrait libre).

Les prévisions du comportement obtenues sont comparées aux résultats des essais réalisés.

c) – Contribuer à la valorisation d'un sous produit (copeaux d'acier d'usinage), afin d'assainir l'environnement des déchets industriels.

2.3 Initiation de Fissures

Au jeune âge, le processus différé (retrait) résulte d'une viscosité importante car le béton n'a pas atteint un durcissement optimal. Au départ d'eau, les déformations différés obtenues précédemment s'avèrent être une source de micro-fissuration. En effet, le comportement du béton inclut un risque de fissuration au dépassement de la résistance naissante par la contribution des déformations différées dans le domaine non-linéaire de comportement (fort ratio contrainte/résistance). Ce risque est d'autant plus important sur des bétons au très jeune âge. Par conséquent, il est souhaitable de limiter les efforts et les déplacements plus longtemps après la mise en œuvre d'un béton [68], [69].

Le potentiel de fissuration peut être déterminé à partir d'essais de retrait empêché qui mettent en évidence la chute d'intensité du retrait dénommée "retrait induit par la contrainte" (Stress-induced shrinkage). Cette réduction du retrait, limite le niveau de fissuration possible ; soit en évitant la création de nouvelles fissures, soit en limitant l'extension des fissures liée au départ d'eau [70].

2.3.1 Fissuration et mécanisme d'action des fibres

La matrice est considérée comme un matériau élastique-fragile. Avec l'incorporation des fibres la matrice évolue plus ou moins d'un comportement fragile vers un mode de type ductile. Dans cette partie nous expliquerons le rôle des fibres face à la propagation des fissures dans le composite.

2.3.2 Mécanisme d'arrêt de la fissuration

Plusieurs chercheurs ont essayé de relier la résistance mécanique du composite à la répartition des fibres et à l'espacement moyen entre les fibres considéré comme un facteur de limitation de la fissuration. Le mécanisme de la propagation des fissures formulé par [71] qu'il y a fissuration si le taux d'énergie de déformation

élastique libérée est supérieur au taux d'énergie nécessaire pour augmenter la fissure. Ce mécanisme a été modélisé de façon mécanique en se basant sur le champ de contrainte à la pointe d'une fissure par [72]. En se basant sur cette théorie, [31] proposaient le concept d'espacement moyen "**S**" en fibres.

$$S = 13.8d \sqrt{1/V_f^\circ}$$

d et V_f° : sont respectivement le diamètre et le pourcentage volumique des fibres

Ce concept est définie de la façon suivante : un composite contenant un volume (V_f°) de fibres à distribution aléatoire, est censé se comporter en présence des efforts uni axiaux, comme un composite à distribution uni axiale de fibres de même diamètre, espacées de "s" et orientées dans le sens des efforts.

2.3.3 Mécanisme d'action des fibres

Les fibres dans une matrice cimentaire ont un rôle analogue à celui des armatures dans le béton, c'est-à-dire reprendre les efforts de traction. Les fibres (macro ou micro) limitent la déformation, la propagation et la coalescence des microfissures au sein de la matrice cimentaire. Les fibres cousent à la fois les fissures existantes en empêchant leur développement et limitent la formation d'autres fissures en renforçant la matrice cimentaire. Ces mécanismes sont montrés à la figure suivante qui présente les trois étapes de propagation de fissures dans une matrice cimentaire lors d'un essai de retrait [74].

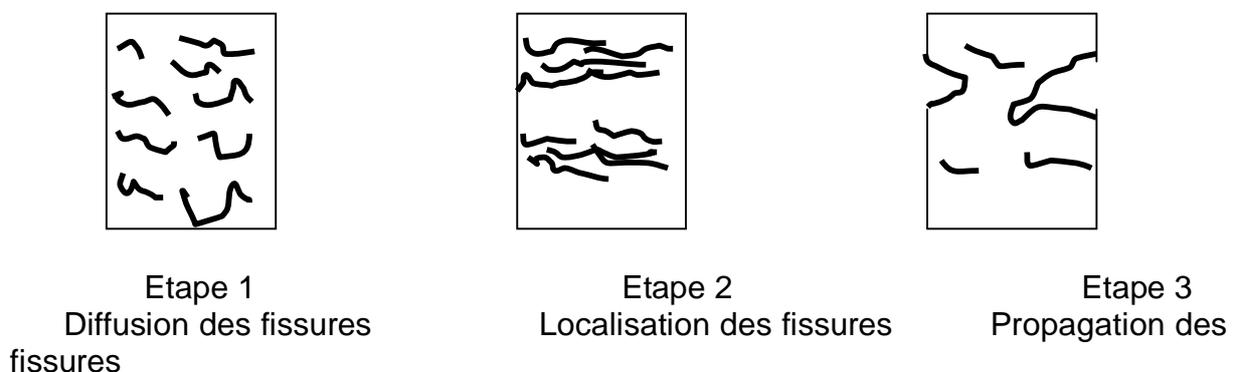


Fig : 2.11 Illustration du processus de fissuration d'une matrice cimentaire

2.3.4 Corsions des fibres métalliques

La résistance du béton renforcé de fibres métalliques aux attaques extérieures ou le milieu ambiant, par exemple à l'action du gel, dépend de la qualité de la matrice et ne devrait pas être très différente de celle d'un béton ordinaire. Les fibres peuvent cependant réduire les dommages dus au gel car elles empêchent la fissuration. Pour obtenir une bonne résistance au gel et à la corrosion par le sel ou des produits chimiques, il faut aussi s'assurer qu'il y a suffisamment d'air entraîné dans le mélange.

[75] rapporte que les fibres ne remplacent pas l'air entraîné et que le béton de fibres avec air-occlu résiste aussi bien au gel qu'un béton sans fibre avec air occlus, avec une résistance de 2 à 3 fois plus que le même béton sans fibres.

Les attaques par les acides et les sulfates et les réactions granulats-alcalis ne sont généralement pas aggravées par la présence de fibres, à moins qu'il y ait une réaction chimique entre les fibres et le béton.

Des essais à long terme, sur la durabilité des bétons renforcés avec des fibres métalliques au laboratoire de batelle 1978, [76] montrent une corrosion minimale sur les fibres qui au contraire n'affecte pas la résistance à la flexion après 7 ans d'exposition, des conclusions similaires ont été conclu par [77].

2.4 Indices de ténacité

La figure. 3.11 montre les représentations des méthodes les généralement utilisées de la mesure de la ténacité. Dans toutes ces méthodes, l'énergie absorbée par l'éprouvette est calculée par l'air sous la courbe charge-flèche. Cette courbe peut être influencée par la forme de l'éprouvette, type de chargement, type d'essai de contrôle, vitesse de chargement.

Plusieurs méthodes ont été proposées. Elles sont longuement discutées dans [78], [79].

En résumé, l'indice de ténacité d'un béton sans fibre est de 1. Celui d'un béton renforcé avec fibres varie avec le pourcentage de fibres, leur nature, mais également des paramètres d'essais ; il est en général supérieur à 5. Cet indice permet de quantifier l'effet mécanique d'une fibre. Toutefois, il faut signaler qu'il dépend beaucoup de la première fissure. Si cette dernière se produit rapidement, l'indice sera fort, et si elle se produit tard, il sera faible.

Les méthodes présentées sont utilisées pour les bétons de fibres d'acier, des variantes existent pour des bétons renforcés de fibres de verre.

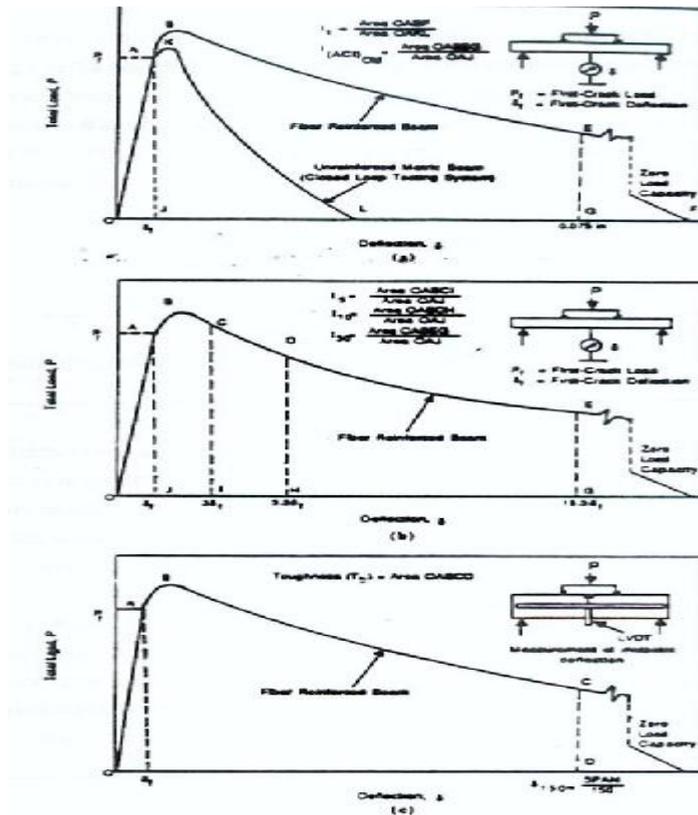


Fig : 2.12 Mesure de ténacité et définition des indices :

(a) ACI Committee 544 ; (b) ASTM C 1018; (c) JCI SPA

2.5 Conclusion

Il apparaît dans l'étude bibliographique que nous avons rapportée dans ce chapitre, il existe une grande famille de matériaux composites, et on s'intéresse uniquement à une sous famille, celle des bétons de fibres métalliques.

D'après les écrits les plus récents, beaucoup de problèmes liés à l'élaboration du matériau, nature des matériaux (toujours locaux), composition pondérale, méthode de mise en œuvre, sont importants. Nous retiendrons de ceci, qu'il est important de bien caractériser les matériaux testés et que la référence au béton sans fibres n'est pas totalement objective.

Cette étude bibliographique a mis en évidence la complexité du phénomène de retrait dessiccation (nombreux mécanismes, effet structural, effet de la vitesse de séchage, hystérésis lors de la réhumidification). Il apparaît donc nécessaire d'adopter une modélisation physique du retrait de dessiccation intrinsèque, basé sur les mécanismes prédominants (dans la gamme d'humidité relative utile pour nos applications) et donc capable de reproduire les principaux aspects expérimentaux mis en évidence. De plus, la fissuration induite influence sensiblement la déformation

de retrait de dessiccation, et nécessite donc d'être prise en compte, au moins à l'échelle macroscopique.

Les études mécaniques rapportées dans la littérature convergent souvent à des résultats globaux sans séparer les caractéristiques du matériau, et les effets induits par l'élément de structure tester (fissuration). De cette idée, il découle la nécessité de compléter les approches globales par des approches très locales. Dans le cadre de cette recherche, nous restons au niveau de l'approche globale, tout en essayant toutefois d'expliquer quelques phénomènes de constatations expérimentales, grâce aux diverses manipulations plus instrumentées.

Chapitre III

CHAPITRE IV

Etude de l'influence des paramètres de renfort, de pourcentage et de conservation sur le retrait du mortier

CHAPITRE IV

*

Etude de l'influence des paramètres de renfort, de pourcentage et de conservation sur le retrait du mortier

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les variations dimensionnelles dues aux retrait. Ce dernier est un processus relativement complexe et par conséquent des contraintes internes de traction dans la matrice cimentaire encore jeune peuvent se produire et provoquer ainsi des déchirures ou fissures au sein de la matrice.

Le présent chapitre est divisé en deux parties, la première consacrée à l'essai de retrait où des variations dimensionnelles en l'absence de chargement. Ces variations sont surtout en relation avec la dessiccation (évaporation de l'eau libre). Il est donc important de connaître l'évolution du phénomène retrait dans le temps et dans trois modes de conservation.

Nous nous sommes intéressé dans la seconde partie à l'apparition de la perte en poids qui est aussi importante comme dans le cas du retrait dans les premiers jours qui devient par la suite presque constante en fonction de l'influence du type de fibres et le pourcentage en volume sur la dispersion des résultats.

Nous avons défini à la fin de ce chapitre une relation entre la variation dimensionnelles et la perte en poids ainsi que l'étude de l'influence de quelques paramètres constitutifs de la liaison sur sa dégradation.

Cependant cette tenue du béton n'est pas garantie sans une connaissance approfondie de son comportement vis-à-vis des différents agressions qu'il subit par son environnement au cours du temps.

Donc, dans cette étude, on déterminera justement la grandeur de cette capacité d'absorption d'eau pour les différents mélanges et de distinguer les paramètres influents sur cette caractéristique.

Une caractérisation préliminaire du comportement mécanique a été réalisée. De faire subir aux différents mélanges des cycles de mouillage séchage (essais de vieillissement) et d'en apprécier le meilleur comportement.

4.1 Introduction : Généralités.

4.1.1 La description et l'exploitation du phénomène de retrait.

Durant le durcissement, la masse (le volume) du mortier ou béton change constamment à cause des conditions hygrométriques de l'environnement. La réduction du volume quand le béton est gardé en plein air est appelé retrait, ou le phénomène inverse ; i.e. augmenter dans le volume quand il est gardé sous l'eau ou dans un climat humide, est appelé gonflement.

Le retrait et / ou le gonflement se développent avec le temps initialement à un grand taux, et va doucement avec le béton âgé et le temps (pour la majorité des mortiers et bétons) tendant vers le zéro après un certain nombre d'années. Dans le calcul du retrait des mortiers et bétons, les valeurs qui sont souvent considérées sont celles qui sont mesurées à 360 jours d'âge. Les expériences ont montré que le record du retrait est après cet âge, jusqu'à ce que le phénomène disparaisse complètement, cela représente un peu plus de 10 à 25 % de la première année du retrait.

Quand la cure alternative dans l'air et dans l'eau, le mortier ou béton subit les deux déformations du retrait et du gonflement, les deux phénomènes deviennent partiellement réversibles. Avec les matrices ordinaires composés de Ciment Portland ou (ceux qui contiennent des clinkers), le retrait est plus important.

Les déformations de retrait et de gonflement sont aussi appelées des déformations initiales prennent place dans un climat où le mortier et le béton ne subissent pas l'action d'une charge mécanique. Si son développement est arrêté, des déformations initiales causent des états de contraintes initiaux qui sont superposés aux contraintes produites par des charges extérieures.

Le retrait du mortier et béton génère des contraintes de traction qui accélèrent et causent la fissuration, par contre le gonflement produit des contraintes de compression, qui, la plupart ne produisent pas une bonne performance structurelle. D'où l'intérêt dans l'investigation dans le phénomène du retrait dans les mortiers et bétons, et après viennent les étapes recommandées dans la mesure de limiter ou (éliminer) les effets préjudiciables du retrait.

Le but de cette recherche est de :

a) – Fournir des informations sur les caractéristiques du retrait du béton renforcé de fibres métalliques.

b) – Evaluer une théorie qui traduit le comportement du matériau composite en fonction du temps à charge nulle (retrait libre). Cette variation dimensionnelle concernant la prévision du retrait et la perte en poids des bétons renforcés de fibres métalliques.

Les prévisions du comportement des variations dimensionnelles obtenues sont comparées aux résultats des essais d'autres chercheurs.

c) – Proposition de quelques aspects caractérisant la durabilité des bétons renforcés de fibres métalliques.

4.2 Programme expérimental

4.2.1 Introduction

Le béton est un matériau en évolution : ses propriétés se modifient constamment et couramment tout au long de son existence. L'hydratation du ciment se poursuit pendant longtemps, augmentant ainsi les résistances mécaniques, physiques et les modules de déformations.

Le béton laisse évaporer une partie de l'eau de gâchage, ou dans le cas contraire il absorbe l'humidité de l'air. Ainsi suivant l'état de conservation atmosphérique, la température et les charges appliquées, le béton sera soumis aux transformations diverses :

- a) variations dimensionnelles (retrait et gonflement)
- b) fluage sous charge maintenue.

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

Les transformations chimiques que subies la pâte de ciment engendre des vides très fins (micropores) de l'ordre de $0.01\mu\text{m}$ dans les hydrates. Ces fines porosités diminuent avec l'évolution de l'hydratation car les vides sont comblés par les

microcristaux. L'eau interne de la pâte de ciment est plus ou moins liée au solide. L'énergie de cette liaison engendre des contractions dans les espaces intergranulaires, ces mouvements provoquent un retrait. La vapeur d'eau dans les capillaires tend à se mettre en équilibre avec l'humidité relative de l'atmosphère [47].

Les retraits des bétons sont deux originaux :

- **Retrait endogène** : il est lié aux modifications de la structure de la pâte de ciment vieillissant (hydratation, carbonatation). C'est la déformation d'un matériau vieillissant en passant par la prise et le durcissement, sans échange d'eau avec l'extérieur.
- **Retrait de dessiccation** : il est lié aux mouvements de l'eau entre le béton et le milieu extérieur (séchage ou humidification) et peut même se manifester dans le cas d'une redistribution hygrométrique à l'intérieur d'une pièce sans qu'il y ait pour autant un échange avec l'extérieur.

Ces deux phénomènes de retrait influent l'un sur l'autre et chacun dépend de différents facteurs.

Dans le cas où il y a combinaison des deux phénomènes, retrait de dessiccation et retrait endogène, il est pas juste de considérer que la déformation globale d'une pièce de béton qui s'hydrate en séchant est la somme des deux retraits [48].

En effet, le séchage modifie la valeur de la déformation endogène pour au moins deux raisons :

- Il change la cinétique des réactions d'hydratation. On sait que l'hydratation s'arrête à une certaine valeur d'hygrométrie (environ 80%).
- Il diminue le gonflement d'origine chimique. C'est d'ailleurs une des difficultés rencontrées lors de l'utilisation des ciments expansifs.

L'interaction entre l'hydratation et la dessiccation peut avoir un effet sur les déformations juste après la prise. D'après [49], en absence de séchage de béton, on n'observe aucun retrait car le retrait d'hydratation est négligeable après une semaine d'âge. Le retrait endogène est d'environ 20 fois plus petit que le retrait hygrométrique à 5 jours et une éprouvette immergée dans l'eau a un gonflement 10 fois plus petit (en valeur absolue) que le retrait dû au séchage.

Dans ce chapitre, on a voulu contribuer à l'étude du phénomène de retrait en entamant un important programme expérimental qui englobe l'étude de l'influence de trois paramètres importants retenus de la recherche bibliographique, sur la mesure du retrait et la perte en poids de mortier.

Conformément aux recommandations, dans nos essais, la mesure à 24 heures après coulage sert de référence. Ainsi, sur les courbes apparaît notamment au jeune âge une superposition du retrait endogène et du retrait de dessiccation.

Dans cette étude, une évaluation de la performance à moyen et long-terme est présentée pour les différents types de mélanges de mortiers. Deux types de fibres, avec deux pourcentages en volume (1% et 2%), utilisant une même composition de base pour tous les mortiers.

Les paramètres retenus pour cette étude expérimentale sont :

- type de fibres métallique (industrielles et copeaux)
- Pourcentage des fibres (1%, 2%)
- Le mode de conservation (ambiant, couvert et saturé)

Le tableau. 4.1 Récapitulatif des différentes compositions utilisées dans notre recherche

Tableau. 4.1	DESIGNATION	NOTATION
1/ mortier témoin		MT
2/ mortier renforcé de 1 % de fibres métallique industrielles		MF10
3/ mortier renforcé de 2 % de fibres métallique industrielles		MF20
4/ mortier renforcé de 1 % de fibres copeaux d'acier		MC10
5/ mortier renforcé de 2 % de fibres copeaux d'acier		MC20

Tableau. 4.2 Quantité des matériaux mise en oeuvre	
Composants	Quantité
Ciment	662 g
Sable (0/5.0)	1327 g

Eau		265 g		
Fluidifiant		13.24 g		
%Fibres	0%	1%	2%	1%
2%				
Notation	MT	MF10	MF20	MC10
MC20				

Tableau. 4.2 Quantité des matériaux mise en oeuvre

4.2.2 Mesure du retrait et de la perte en poids d'éprouvettes de mortier (NF P 15-433)

4.2.2.1 Objectif de l'essai.

Il consiste à évaluer le retrait axial, ou le gonflement des éprouvettes (7 x 7 x 28) des 5 mélanges ainsi que leur perte en poids.

4.2.2.2 Equipement utilisé.

Il est recommandé dans la norme NF P 15-433.

- Une salle dont la température est maintenue à $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et l'humidité relative à $55\% \pm 5\%$.

- Un bain d'eau dont la température est maintenu à $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

- Un malaxeur normalisé.

- Une balance.

- Des moules de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont équipés de plots de retrait en laiton.

Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du mortier, puis dévissés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes 7 x 7 x 28 sont donc munis à leurs extrémités de plots. Ensuite, les éprouvettes ont été conservées dans une salle régulée 20 °C et 55% d'hygrométrie.

- Un rétractomètre digital équipé d'un comparateur électronique. Une tige en invar permet l'étalonnage de l'appareil grâce à deux billes solidaires à tige distantes de $L = 200\text{ mm}$.



APPAREIL DE MESURE DE RETRAIT

4.2.2.3 Principe de l'essai.

On compare les mesures de valeurs initiales (de référence) qui sont faites à 24 heures au moment du démoulage, à différents temps (t) chaque 24 h, la variation de longueur d'une éprouvette 7 x 7 x 28, par rapport à sa longueur à un temps (t₀) pris pour origine.

Le principe de lecture, le comparateur est mis à zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 200 mm. Soit dl

(t) la valeur lue sur le comparateur au temps (t) ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré l = L + dl(t).

Soit l(t₀) la longueur de l'éprouvette au temps t₀ choisi pour origine. En général cette origine est prise au moment du démoulage, soit 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps (t) sera

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0).$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

Δl(t) est obtenu en faisant la moyenne entre les trois éprouvettes issues du même moule.

Lorsque les éprouvettes en mortier sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif, alors c'est le gonflement.

Les différentes étapes de l'essai sont résumées dans le tableau. 4.3 :

Tableau. 4.3 : Essai de retrait

N°	Type de mélange	Nombre d'éprouvette	Corps en (cm)	Conservation T°C, HR %	Type D'appareil	Mesures	âge
1	5 mortiers	9	7x7x28	20°C, 55% 20°C, 75% 20°C, 100%	Dilatometre	Déformation perte en poids	à 90 jours

4.3 Résultats et commentaire

4.3.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons exposer les résultats des différents essais et mesures et en dégager des conclusions. Nous aborderons d'abord l'étude du retrait libre dans les différents modes de conservation (ambient, couvert et saturé), suivit par celle du séchage du matériau (perte en poids).

Nous allons analyser l'influence du type de fibres métalliques, du pourcentage en volume et des conditions hygrométriques.

Les tableaux. 4.4 à 4.6 représentent les déformations de retrait des éprouvettes pour différents âges.

On constate que le retrait est directement dépendant de la teneur en fibres et de l'élanement de ces derniers.

Les courbes de toutes les éprouvettes sont convergentes vers un degré de stabilisation d'équilibre à un certain âge par rapport aux éprouvettes témoins.

a) mode ambiant :

Mode de conservation	Ambiant Tableau. 4.4			
	Age	7j	28j	90j
MT		350	550	630
MF10		330	510	530
MC10		300	480	510
MF20		280	445	460
MC20		250	420	450

b) mode couvert :

Mode de conservation	Couvert Tableau. 4.5			
	Age	7j	28j	90j
MT		330	520	620
MF10		310	500	510
MC10		300	490	500
MF20		260	420	460
MC20		250	420	460

c) mode saturé :

Mode de conservation	Saturé Tableau. 4.6			
	Age	7j	28j	90j
MT		-500	-530	-530
MF10		-380	-410	-410
MC10		-350	-370	-370
MF20		-310	-340	-340
MC20		-320	-340	-340

Les tableaux. 4.7 à 4.9 représentent les pertes en poids des différents mélanges des éprouvettes pour différents âges.

d) mode ambiant :

Mode de conservation	Ambiant $\times 10^{-3}$ Tableau. 4.7			
	Age	7j	28j	90j
MT		100	110	110
MF10		115	118	118
MC10		112	115	115
MF20		125	125	125
MC20		125	125	125

e) mode couvert :

Mode de conservation	Couvert $\times 10^{-3}$ Tableau. 4.8			
	Age	7j	28j	90j
MT		87	105	110
MF10		95	108	110
MC10		100	115	115
MF20		95	108	110
MC20		100	115	115

f) mode saturé :

Mode de conservation	Saturé $\times 10^{-3}$ Tableau. 4.9			
	Age	7j	28j	90j
MT		-25	-53	-56
MF10		-35	-35	-35
MC10		-30	-32	-34
MF20		-34	-35	-35
MC20		-28	-32	-34

4.3.2 Influence des différents paramètres

a) Influence du type de fibres.

Eprouvette exprimé en	Retrait à 90 jours	Retrait (%) de
MT	100%	630
MF10	84%	530
MC10	80%	510
MF20	73%	460
MC20	71%	450

Les valeurs indiquées représentent la moyenne de trois mesures. Le coefficient de variation à 90 jours est de 4% pour le dosage de 1% de fibres, et de 2% pour le dosage de 2% par rapport au témoin.

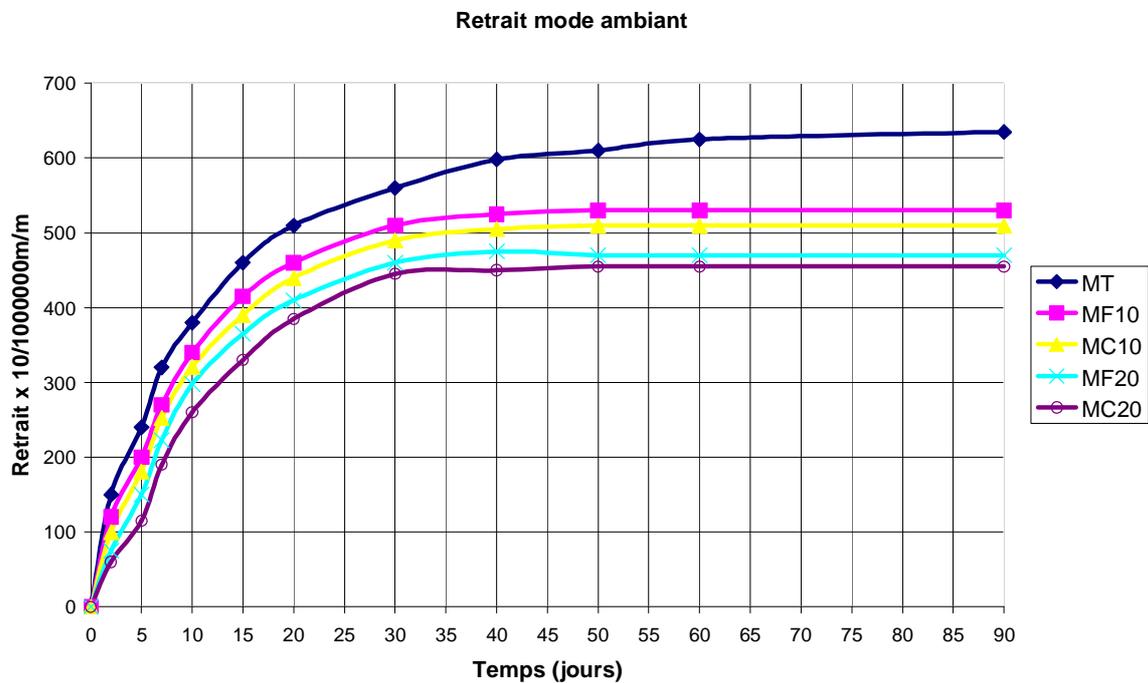


Fig : 4.1 Retrait libre sur différents mortiers (mode ambiant)

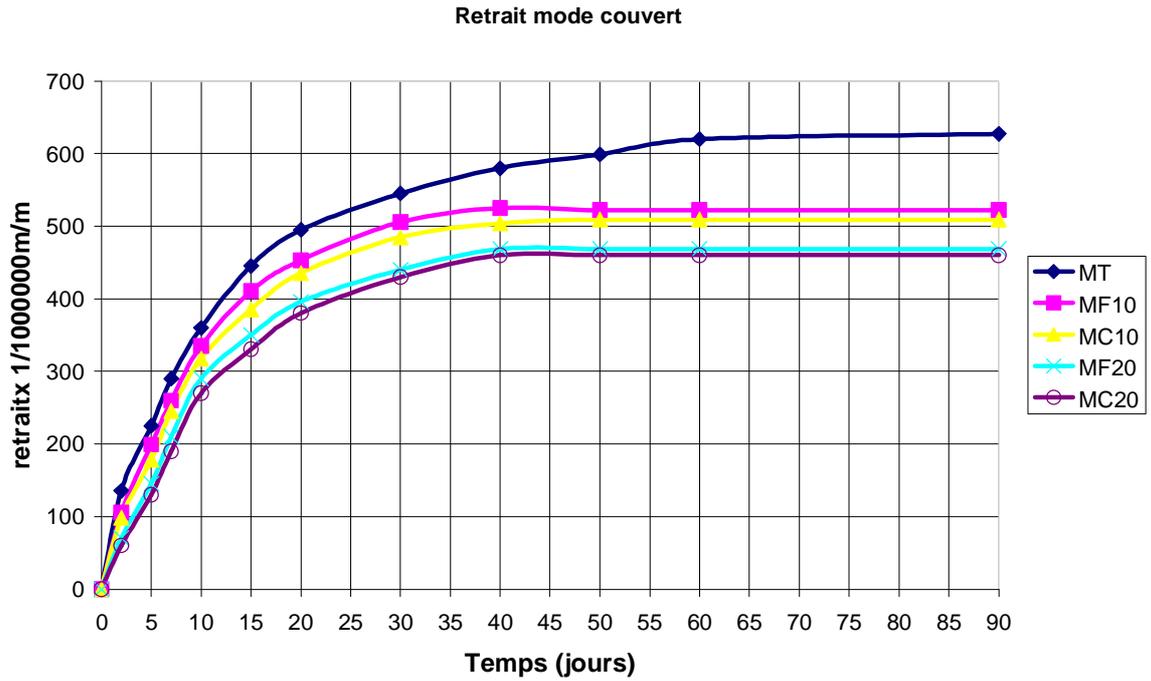


Fig : 4.2 Retrait libre sur différents mortiers (mode couvert)

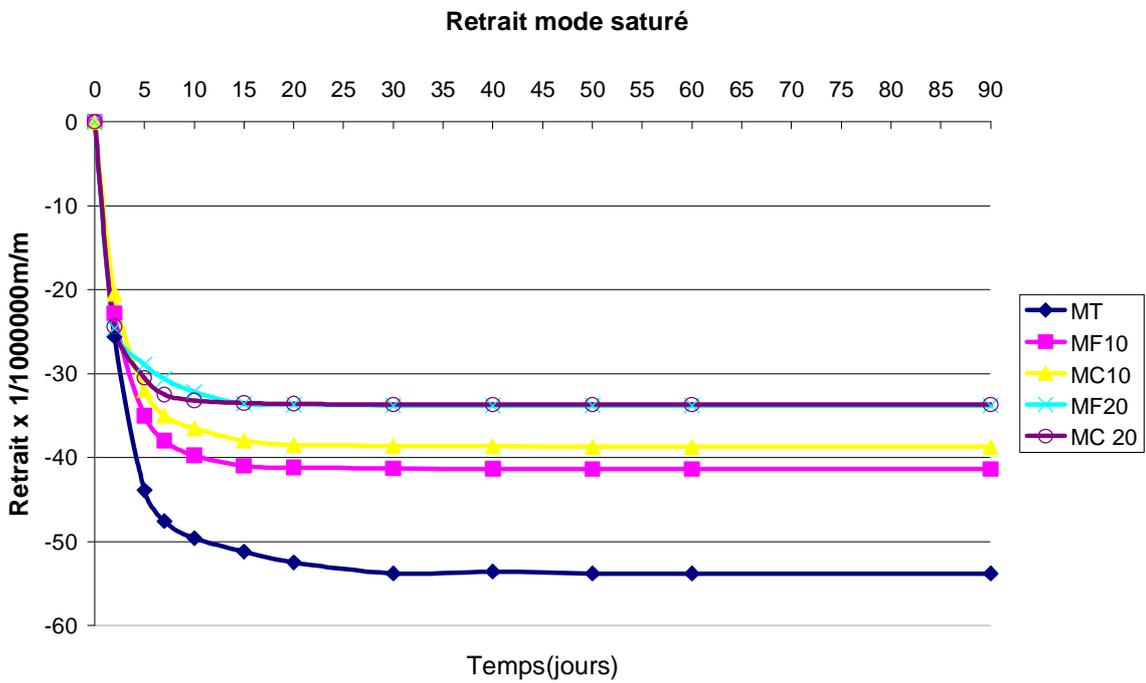


Fig : 4.3 Retrait libre sur différents mortiers (mode saturé)

On constate que les fibres diminuent le retrait, cette diminution est de l'ordre de 29 % par rapport au mortier sans fibres à 90 jours. Il y a très peu de différence entre les deux types de fibres (environ de l'ordre de 6 %).

Le tableau suivant permet de suivre le retrait des matériaux au cours du temps en donnant le pourcentage de retrait obtenu à trois dates, déterminé en référence à celui de 90 jours.

Tableau. 4.10 : Retrait des matériaux au cours du temps

	7jours	28jours	60jours
MT	50%	88%	96%
MF10	52%	94%	98%
MC10	50%	94%	98%
MF20	47%	97%	99%
MC20	42%	95%	99%

Après une longue durée, l'action des fibres est plus précise. Car les mortiers de fibres se stabilisent plus rapidement que les mortiers témoins. Comme on le constate sur la figure 4.1.

Nos résultats confirment ceux déjà obtenus par des études antérieures sur l'influence des fibres d'acier sur le retrait [84], [85], [86], [87] : à savoir que les déformations de retrait sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles du béton normal. Cette réduction est affectée par plusieurs paramètres tels que :

- La durée de séchage : les différences sont plus marquées après une durée plus importante (de 150jours) [88]
- La forme et la quantité de fibres semblent être les facteurs les plus importants qui dominent le retrait [89], [90], [91]. Les fibres courtes sont plus efficaces [92].

b) Influence du pourcentage en volume des fibres.

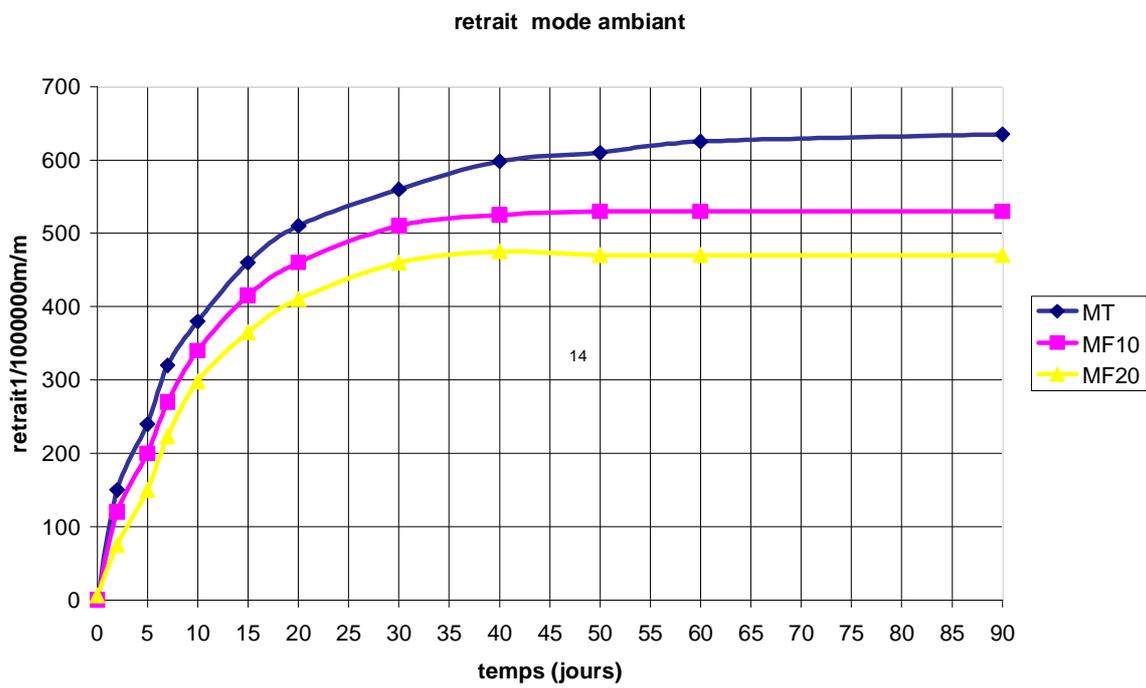


Fig : 4.4 Influence du % sur le retrait avec (fibres industrielles)

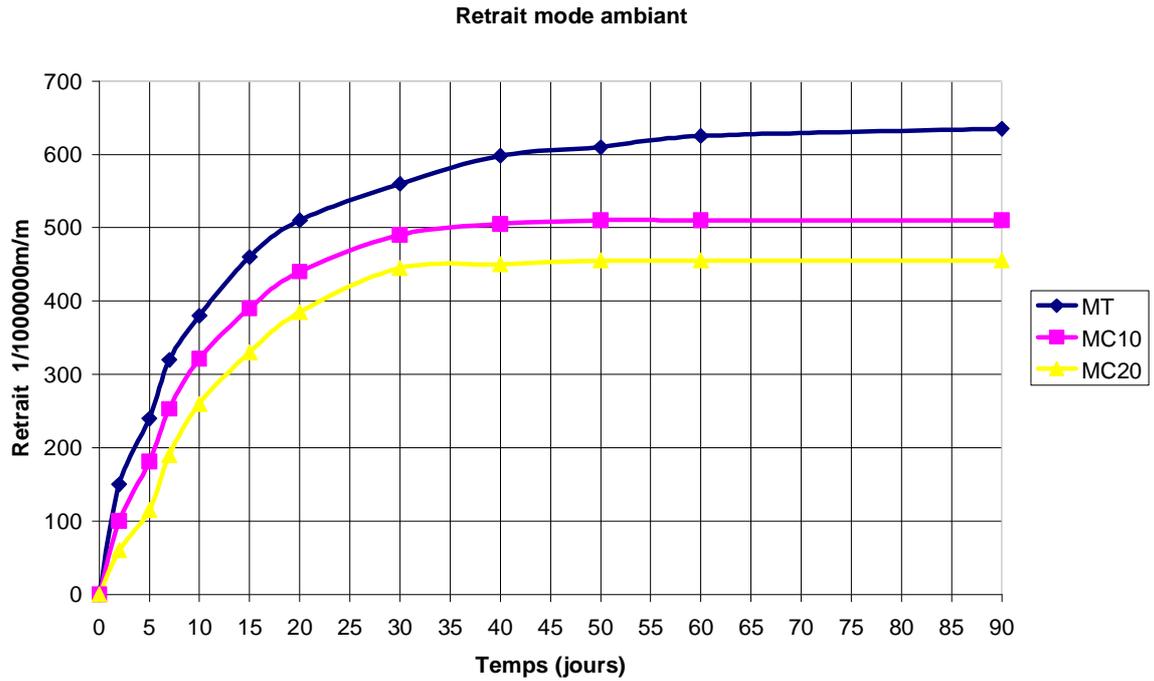


Fig : 4.5 Influence du % sur le retrait avec (fibres copeaux) mode ambiant

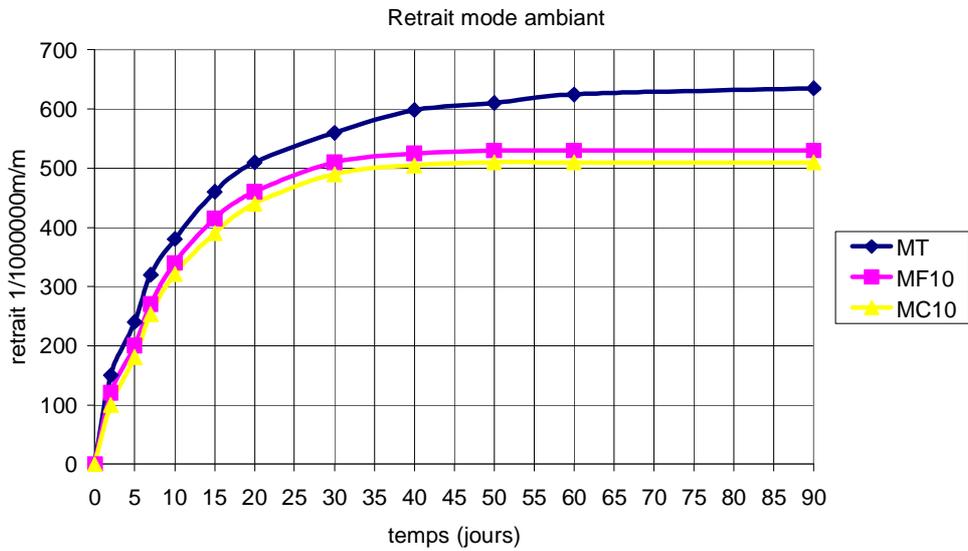


Fig : 4.6 Influence du % sur le retrait (fibres industrielles et copeaux) (1%) mode ambiant

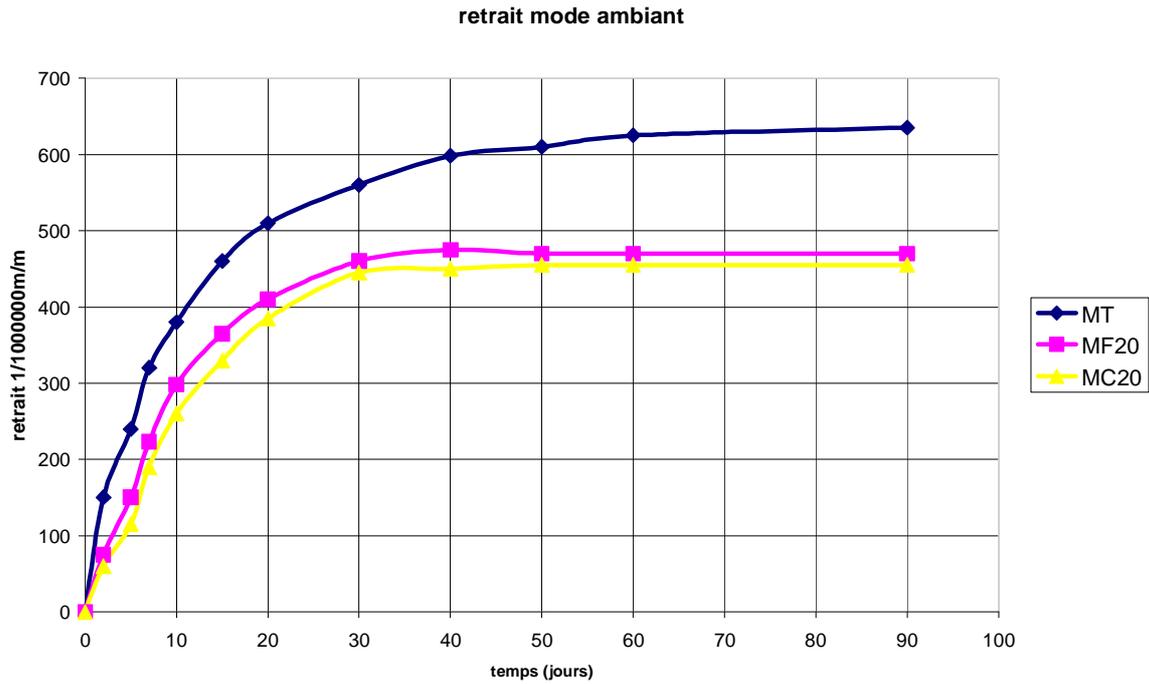


Fig : 4.7 Influence du % sur le retrait (fibres industrielles et copeaux) (2%) mode ambiant

Les figures 4.4 à 4.7 montrent l'évolution du retrait dans le temps en fonction du pourcentage des fibres. Ce qui valide l'hypothèse du développement d'une surface spécifique importante pour un pourcentage de 2 %, ce qui réduit le retrait par rapport au matériau témoin en faisant la comparaison entre les courbes.

Il apparaît cependant, que le pourcentage améliore les variations dimensionnelles, cette diminution est de l'ordre de 19 % par rapport au mortier sans fibres à 30 jours et de 10 % entre les deux pourcentages soit (fibres industrielles) ou (fibres copeaux) conserver dans un climat ambiant.

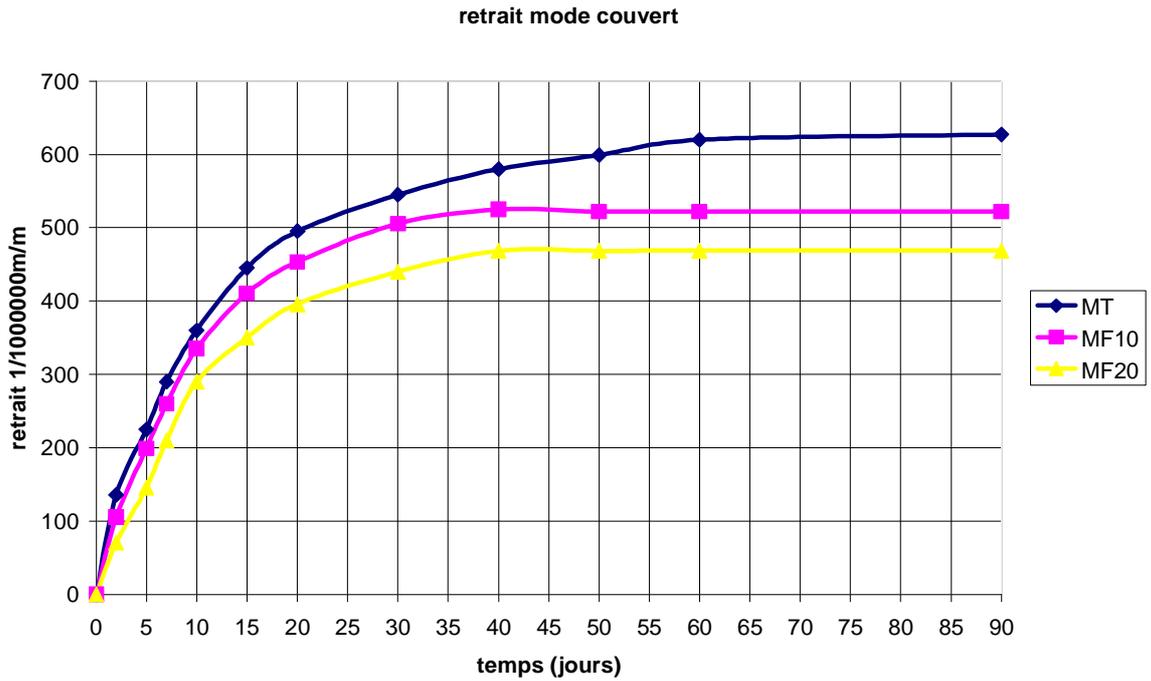


Fig : 4.8 Influence du % sur le retrait avec (fibres industrielles) mode couvert

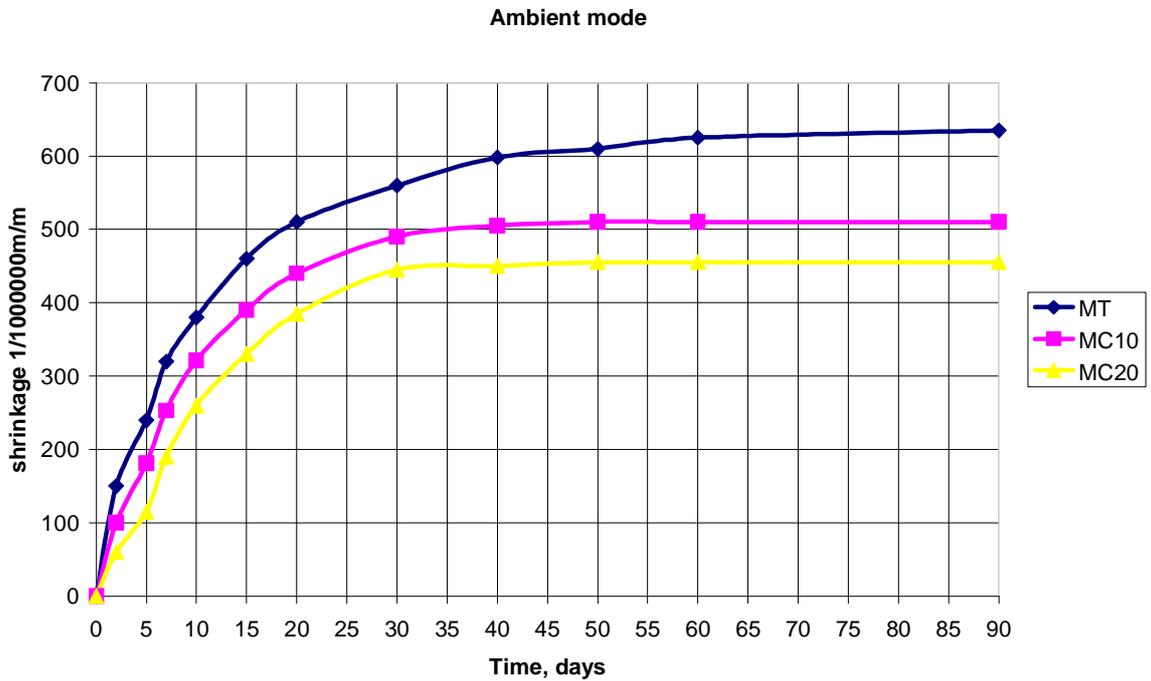


Fig : 4.9 Influence du % sur le retrait avec (fibres copeaux) mode couvert

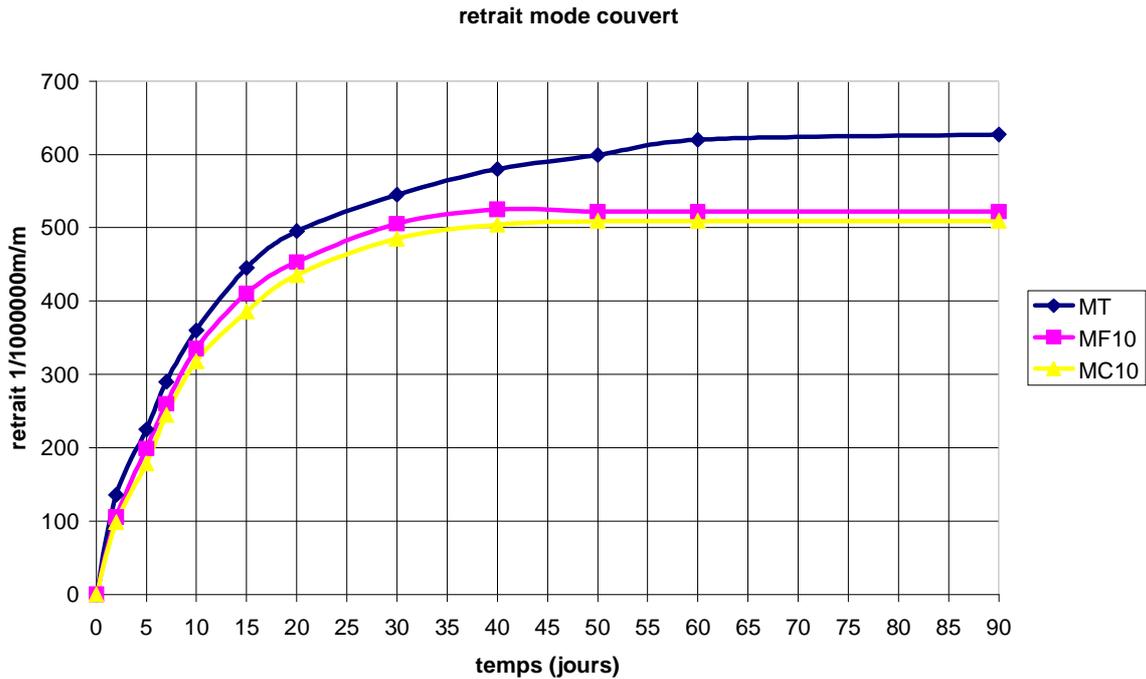


Fig : 4.10 Influence du % sur le retrait avec (fibres copeaux et industrielles) 1% mode couvert

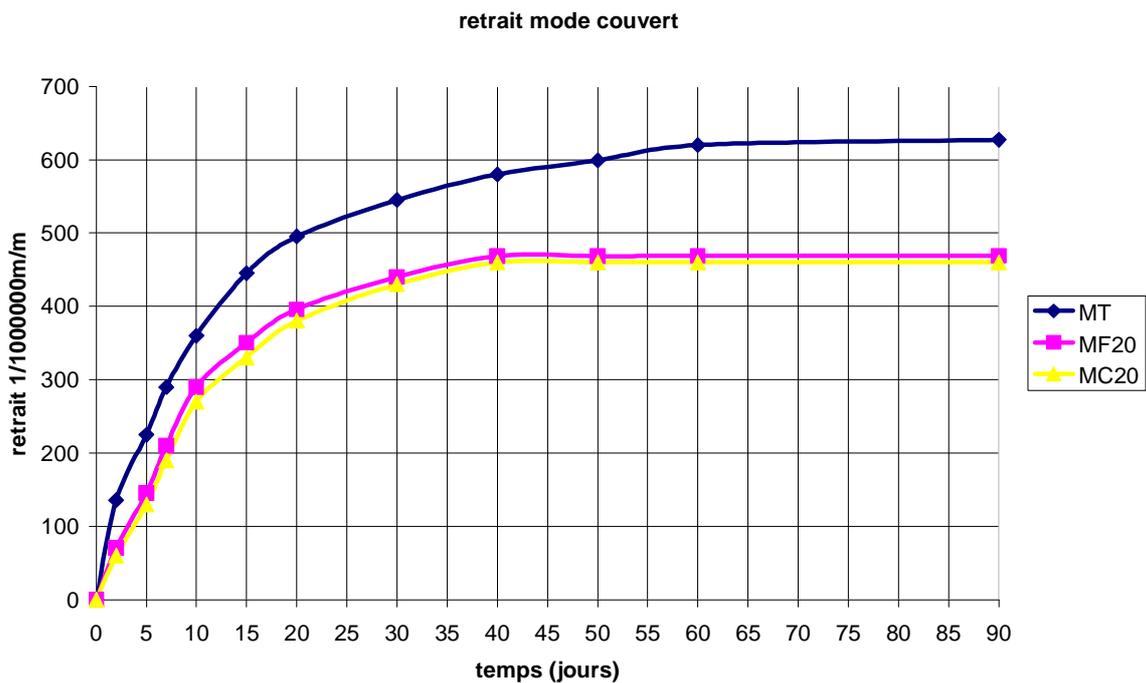


Fig : 4.11 Influence du % sur le retrait (fibres industrielles et copeaux) 2% mode couvert

Nous constatons comme pour le cas du mode ambiant. Les figures 4.8 à 4.11 le fuseau des valeurs de retrait est étroit au début de séchage jusqu'à 30 jours entre les mortiers renforcés de fibres et le mortier témoin, et il est étiré après pour prendre le temps constant.

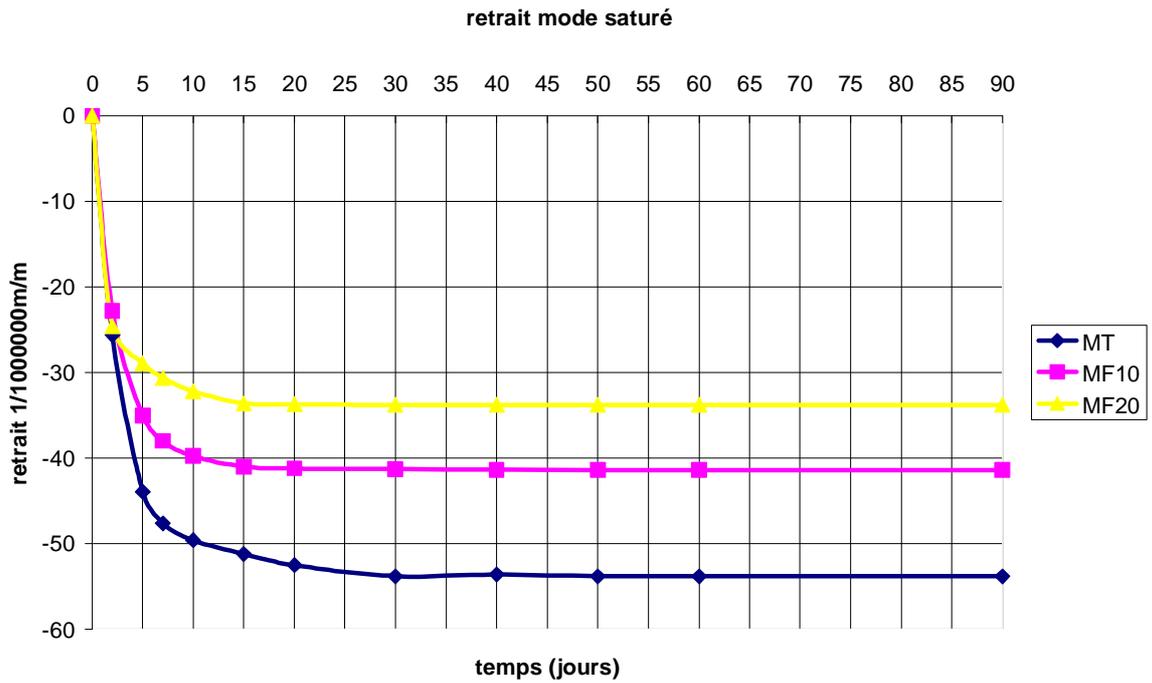


Fig : 4. 12 Influence du % sur le retrait (fibres industrielles) mode saturé

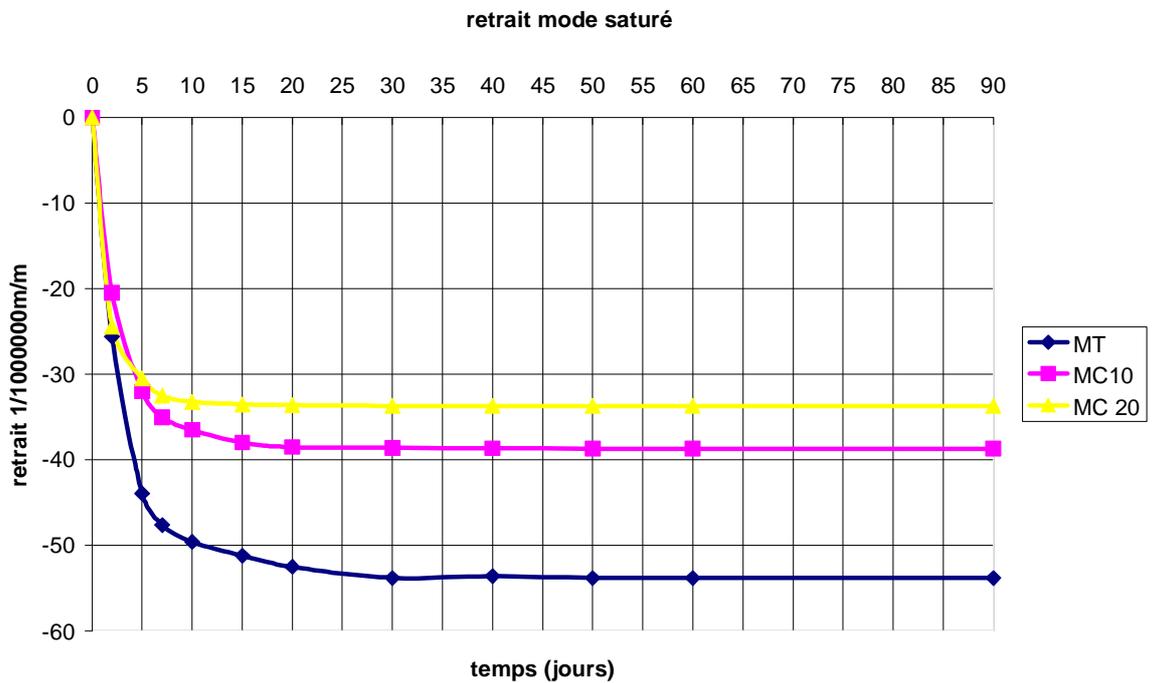


Fig : 4.13 Influence du % sur le retrait (copeaux) mode saturé

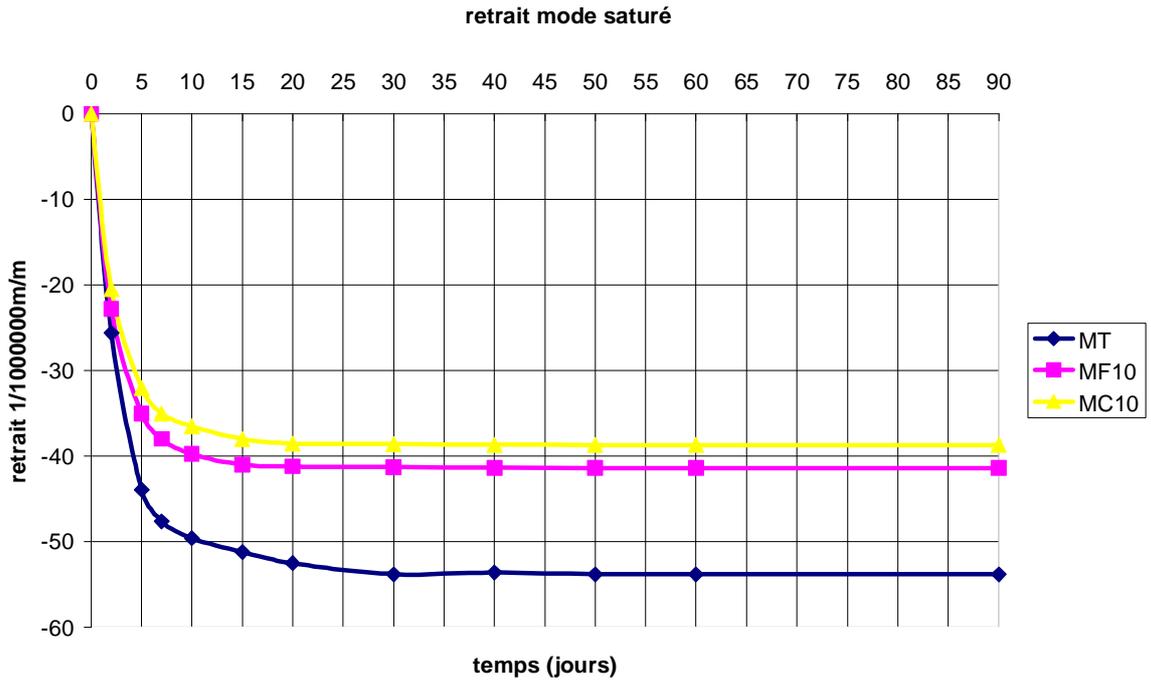


Fig : 4.14 Influence du % sur le retrait (fibres industrielles et copeaux) (1%) mode saturé

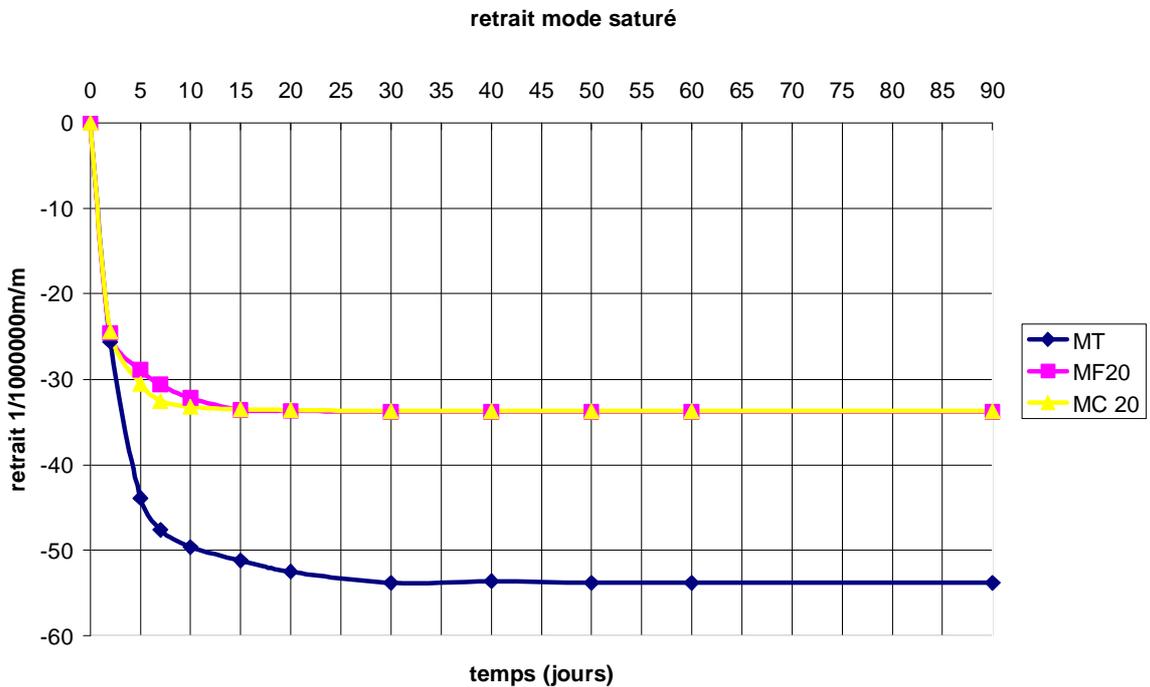


Fig : 4.15 Influence du % sur le retrait (fibres industrielles et copeaux) (2%) mode saturé

La teneur des fibres est d'ordinaire représentée par la fraction du pourcentage du volume du béton. La teneur des fibres de 1% signifie qu'il y a approximativement 78,5 kg de fibres par mètre cube dans le béton. La proportion de l'aspect des fibres

est écrite de la manière suivante : l/d ; l est la longueur de la fibre et d le diamètre effectif de la fibre.

Comme expliqué précédemment, la contrainte de déformation du béton renforcé de fibres due aux fibres est le résultat du mécanisme d'interface du joint entre les fibres et la matrice.

Des valeurs larges l/d peut favoriser une aire de contact large le long de l'interface et peut augmenter la capacité de la contrainte. L'essai d'évidence montré dans les Fig : 4.12 à 4.15 indique qu'une augmentation de ces deux facteurs peut diminuer le retrait du béton. On peut clairement observer que plus la teneur des fibres est importante, plus bas est la valeur du retrait.

Le phénomène ci-dessus peut être expliqué par le frottement qui existe le long de la frontière de contact entre les fibres et la matrice. Ce joint de frottement peut réduire la déformation du retrait et raisonnablement redistribuer la tension mal équilibrée due au retrait.

Une grande teneur des fibres ou un grande proportion d'aspect peut augmenter l'aire de contact entre les fibres et la matrice ; et peut par conséquent augmenter l'ensemble de la force de joint et pendant ce temps réduire la déformation du retrait [90].

c) Influence du mode de conservation.

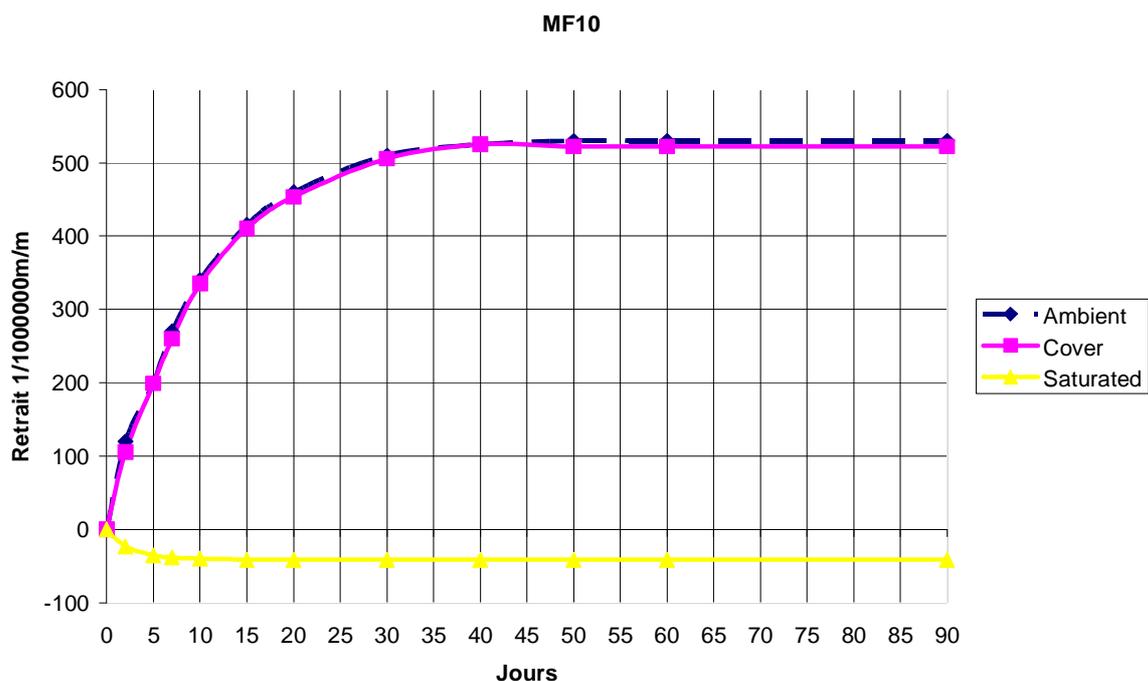


Fig : 4.16 Influence du mode de conservation sur le retrait du mélange MF10

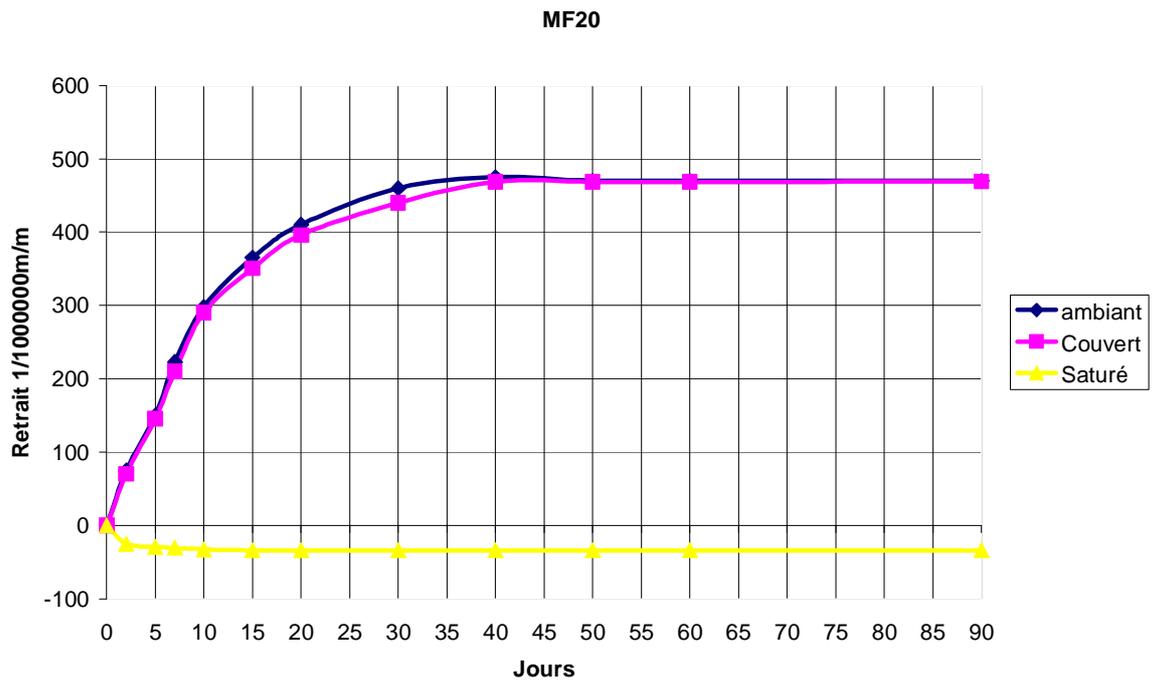


Fig : 4.17 Influence du mode de conservation sur le retrait du mélange MF20

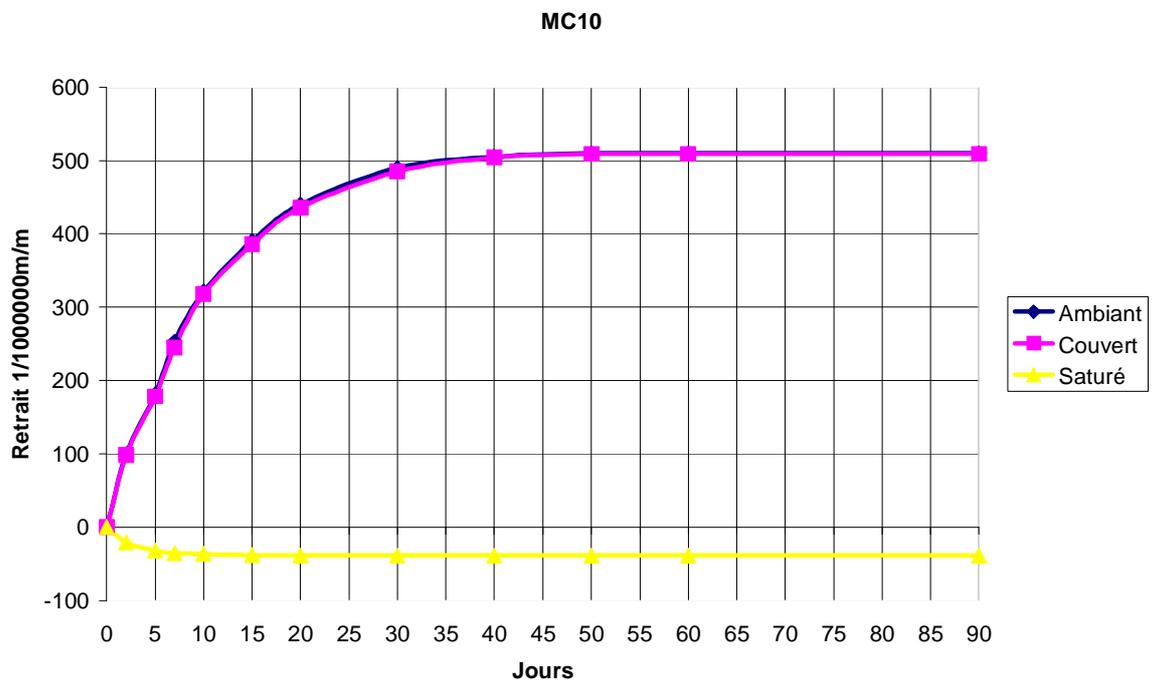


Fig : 4.18 Influence du mode de conservation sur le retrait du mélange MC10

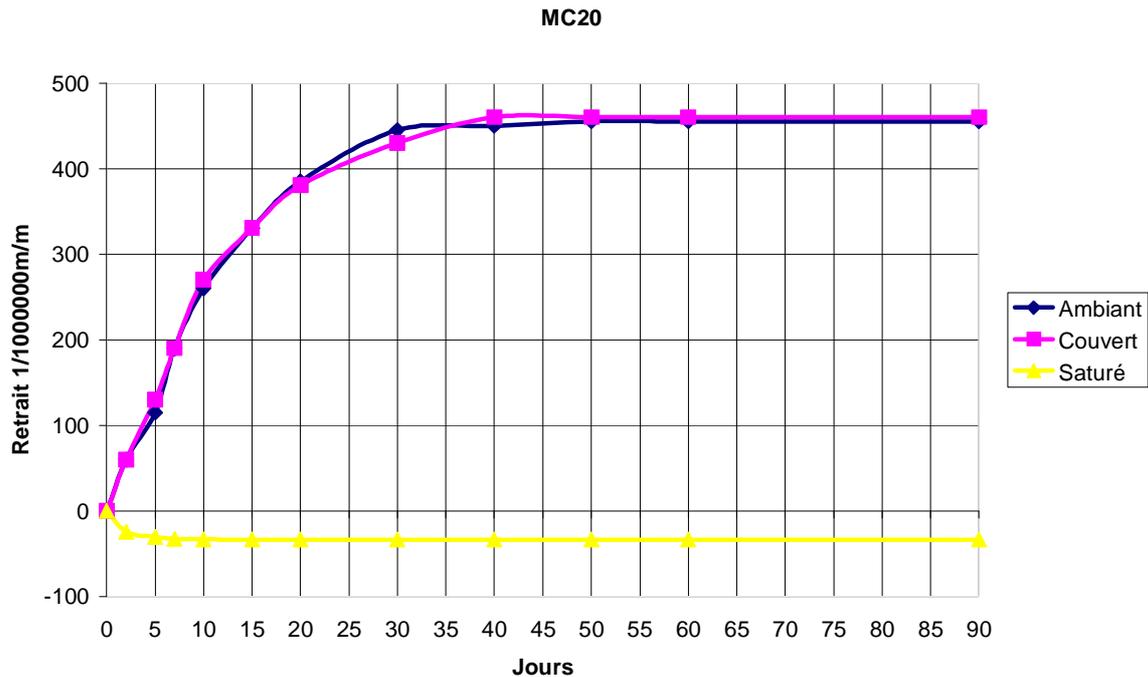


Fig : 4.19 Influence du mode de conservation sur le retrait du mélange MC20

On constate que le mode de conservation joue un rôle très important sur le retrait du mortier, plus le milieu est humide plus le retrait est de plus en plus faible, cette diminution est de l'ordre de 89 % entre la conservation ambient et la conservation saturée à 90 jours. Il y a très peu de différence entre la conservation ambient et la conservation couverte (environ de l'ordre de 3 %).

Si on s'intéresse aux mêmes comparaisons, on constate que jusqu'aux alentours de 30 jours, nos résultats confirment ceux déjà obtenus par des études antérieures sur l'influence du de conservation [85] ;[84] ;[86] : à savoir que les déformations de retrait sont généralement très petites pour les bétons de fibres conservées en milieu saturé. Cette réduction est affectée par plusieurs paramètres tels que :

- L'effet de l'âge a résulté à une diffusion lente de l'humidité et un retrait moindre du au petit coefficient de diffusion dans le béton.
- Deuxièmement, l'augmentation de la raideur et la solidité du lien interfaciale entre la fibre et la matrice due aux effets du mode de conservation donne un retrait du béton effectivement très faible.

4.3.3 Perte en poids des différents mélanges

Le retrait ne serait déroulé sans qu'il y ait eu une perte d'eau et par conséquent une perte de masse. Les figures 4.20 à 4.28, relatives à la perte de masse dans le temps pour les deux types de fibres avec 1% et 2% employées, confirment bien l'existence du retrait enregistré dans les matériaux testés. Les valeurs de mesure du poids échelonnées dans le temps sont représentées dans les tableaux annexes.

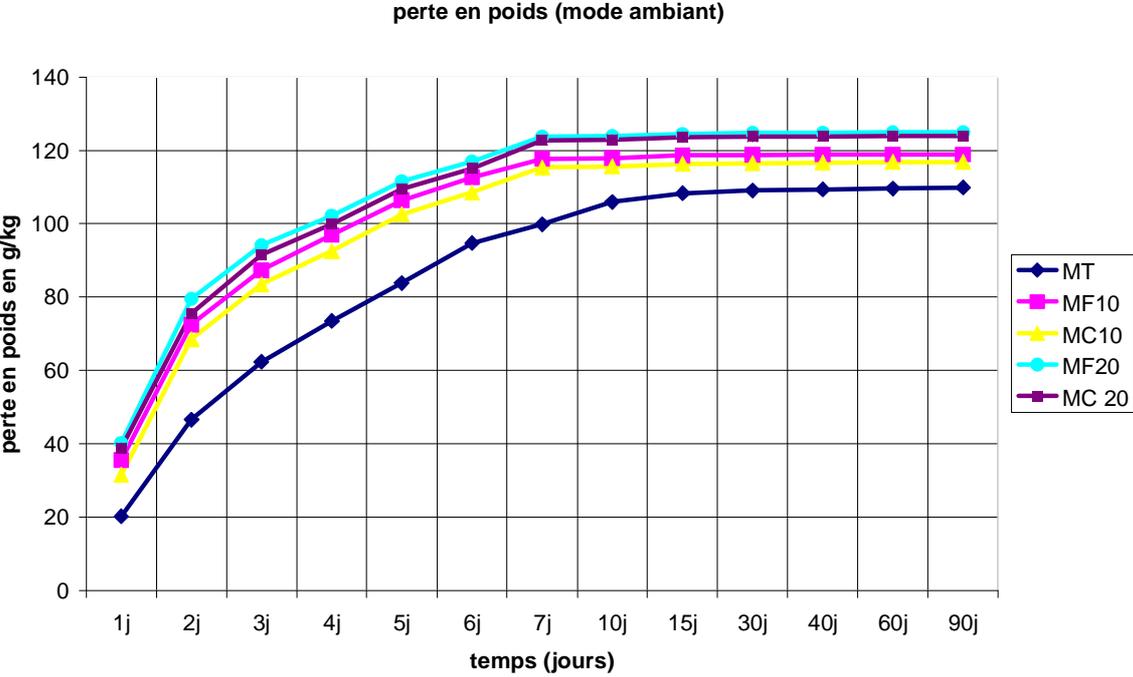


Fig : 4.20 Perte en poids à partir de 24 heures mode ambiant

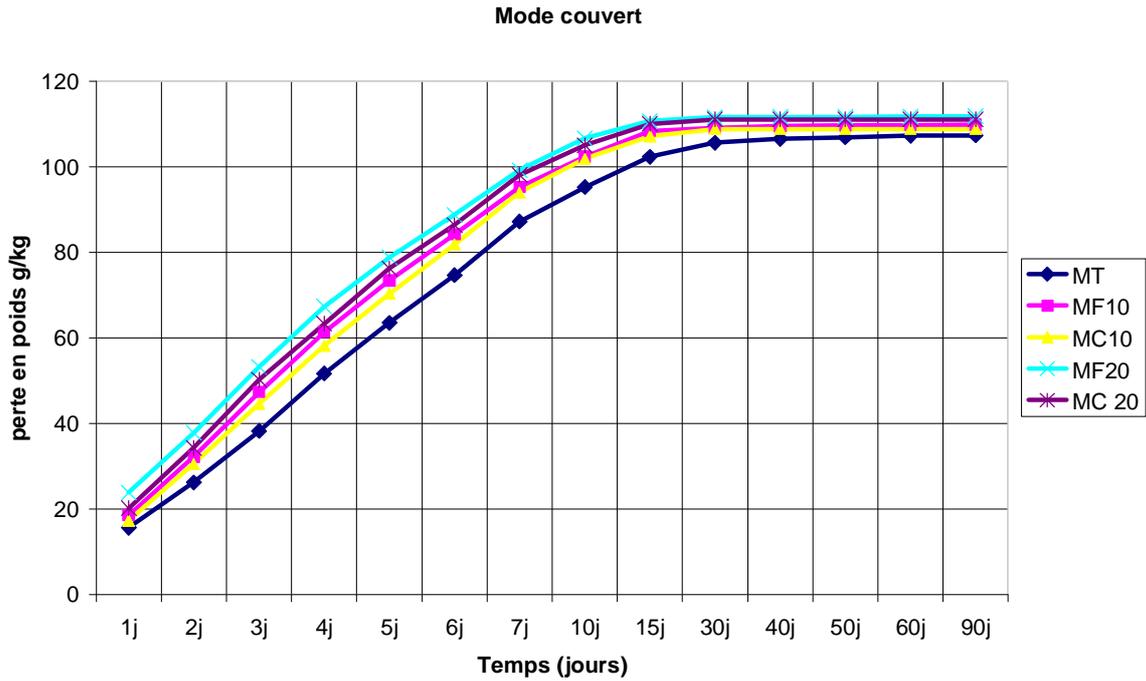


Fig : 4.21 Perte en poids à partir de 24 heures mode couvert

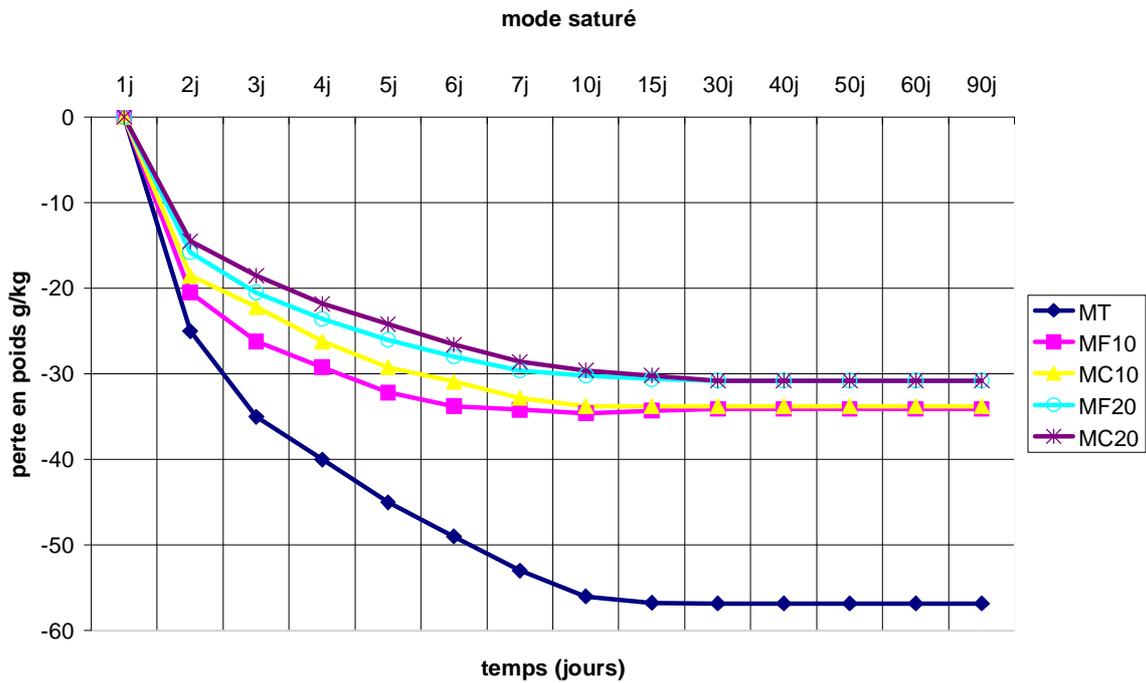


Fig : 4.22 Perte en poids à partir de 24 heures mode saturé

Nous mettons en relation la perte en poids (dessiccation) et le retrait. [85] constatent que la perte en poids est plus grande pour les matrices renforcées de fibres que pour les témoins. Dans notre étude la même constatation est faite. Les fibres peuvent créer un chemin préférentiel pour le départ de l'eau.

4.3.3.1 Influence du type de fibres sur la perte en poids (mode ambiant)

Mode ambiant MF10 et MC10

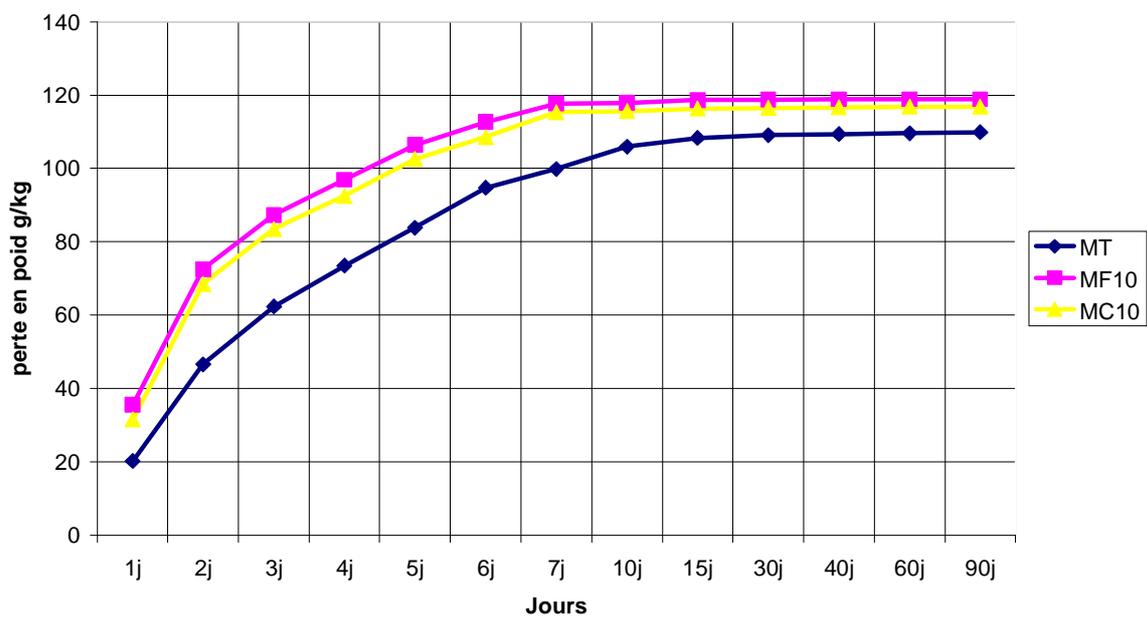


Fig : 4.23 Influence du type de fibres sur la perte en poids mode ambiant

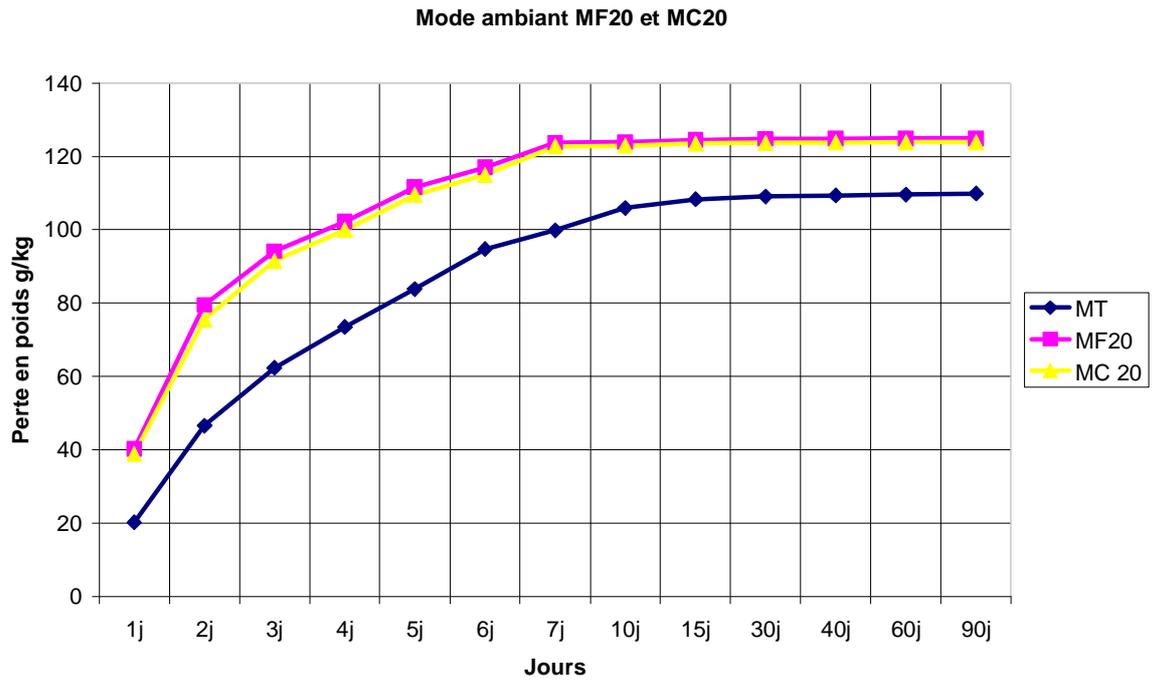


Fig : 4.24 Influence du type de fibres sur la perte en poids mode ambiant

4.3.3.2 Influence du type de fibres sur la perte en poids (mode couvert)

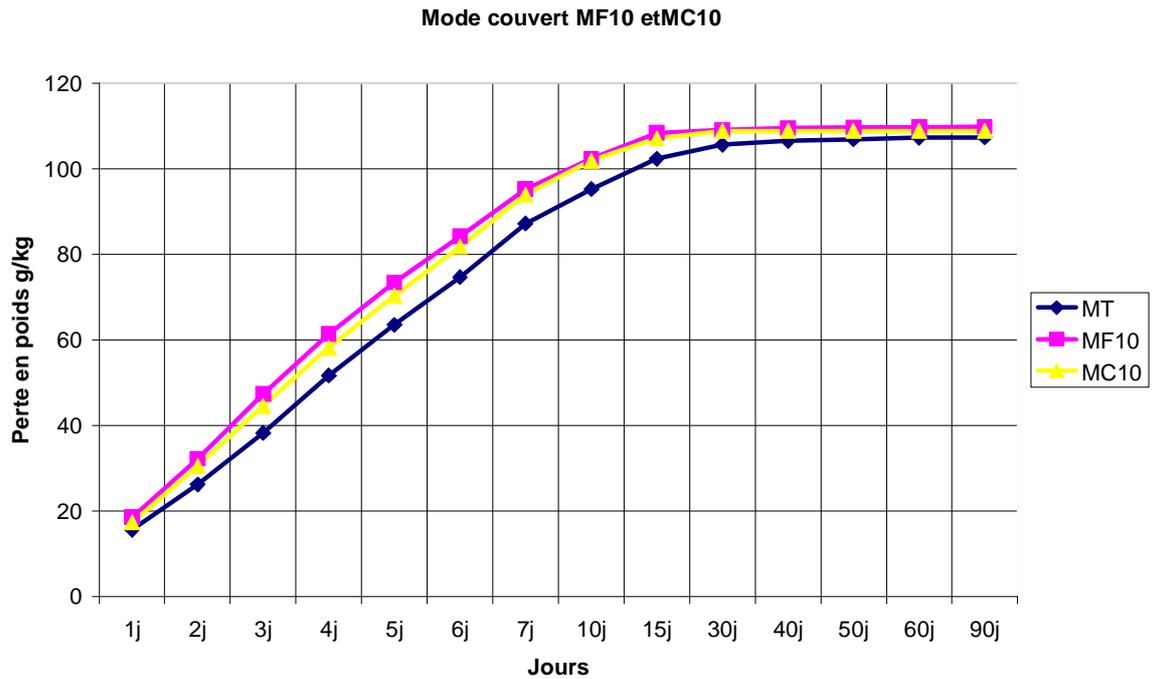


Fig : 4.25 Influence du type de fibres sur la perte en poids mode couvert

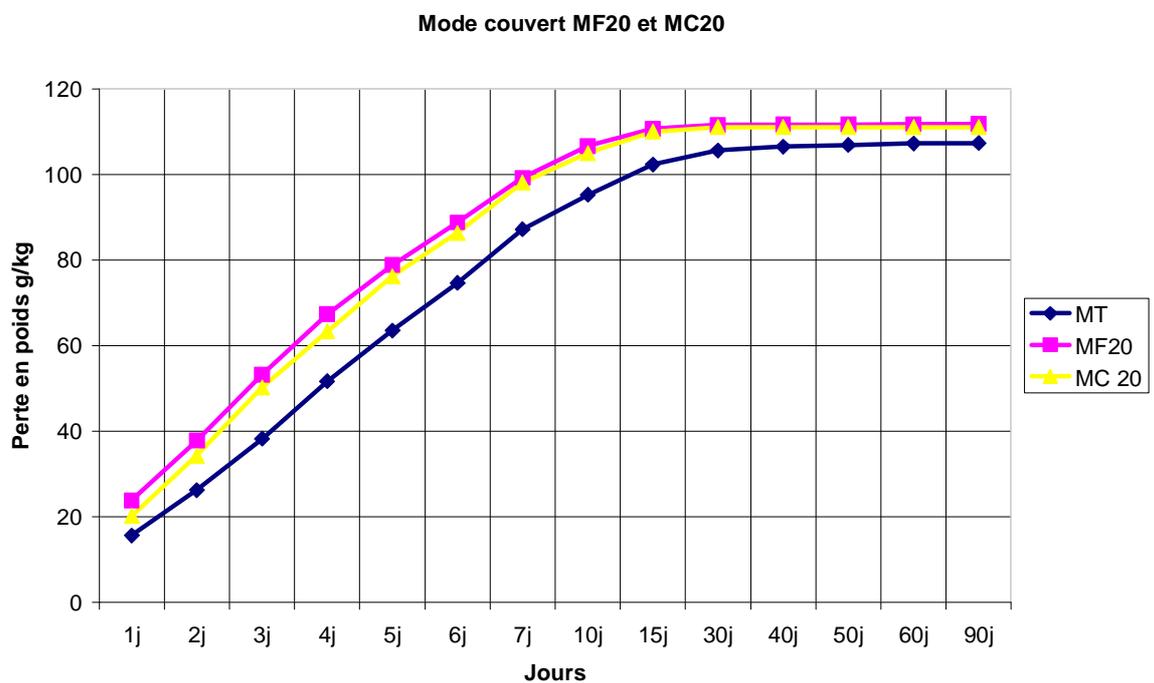


Fig : 4.26 Influence du type de fibres sur la perte en poids mode couvert

4.3.3.3 Influence du type de fibres sur la perte en poids (mode saturé)

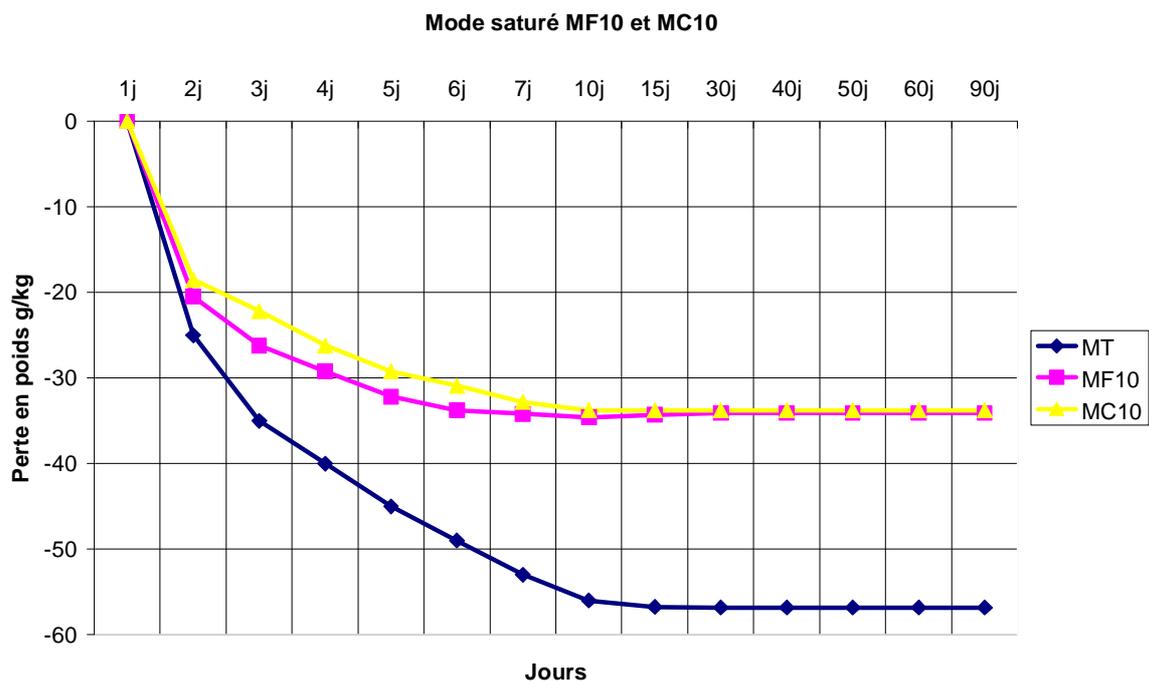


Fig : 4.27 Influence du type de fibres sur la perte en poids mode saturé

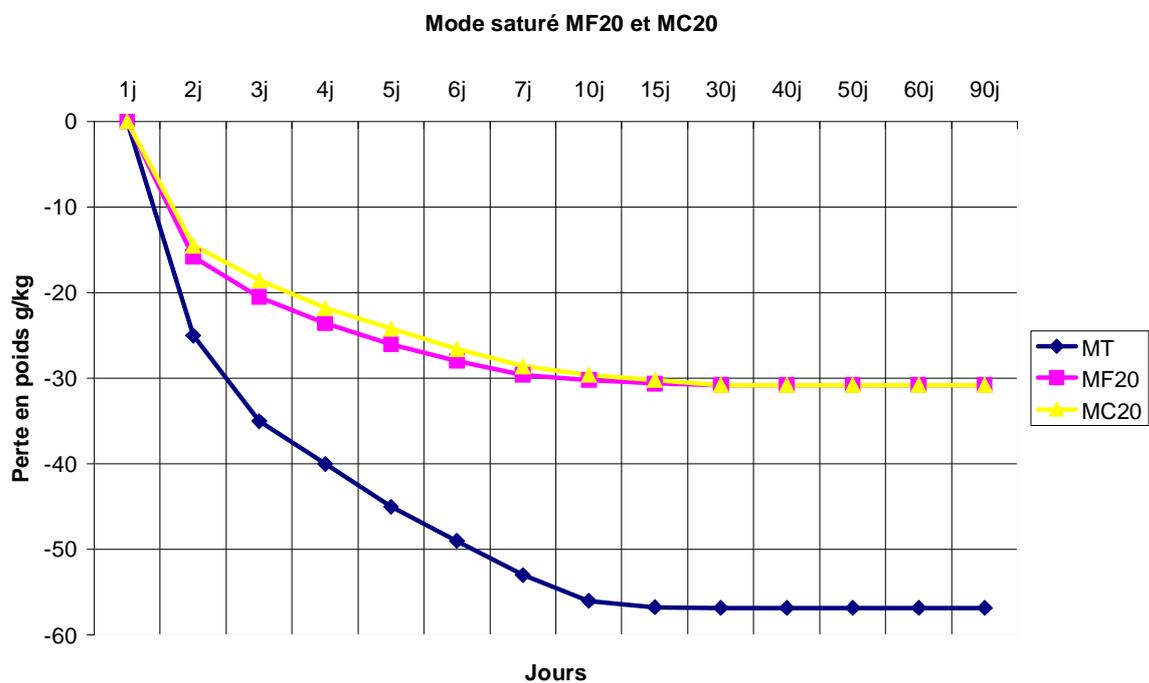


Fig : 4.28 Influence du type de fibres sur la perte en poids mode saturé

La perte en masse est aussi importante comme dans le cas du retrait dans les premiers jours et devient par la suite presque constante, sur ces courbes, nous

constatons l'influence du type de fibres et le pourcentage sur la dispersion des résultats.

On constate qu'à très jeune âge le mortier renforcé de fibres perd plus d'eau presque le double que le mortier témoin, cela est dû sans doute à la forme des fibres (ondulé) qui favorise le départ de l'eau par un chemin tracé dans la structure poreuse du mortier ; dans le mortier témoin l'eau se trouve piégée (emprisonnée). Plus la quantité de fibres augmente plus la perte en poids augmente. Au-delà de cette échéance on remarque que la perte en poids se stabilise.

Il apparaît que certains échantillons enregistrent un gain en poids au cours du séchage. Ce phénomène est probablement dû à la carbonatation ou bien à l'absorption par les échantillons de l'humidité amenée par d'autres matériaux fraîchement entreposés dans l'enceinte du de séchage.

Eprouvette 7x7x28xcm à 1%vol,

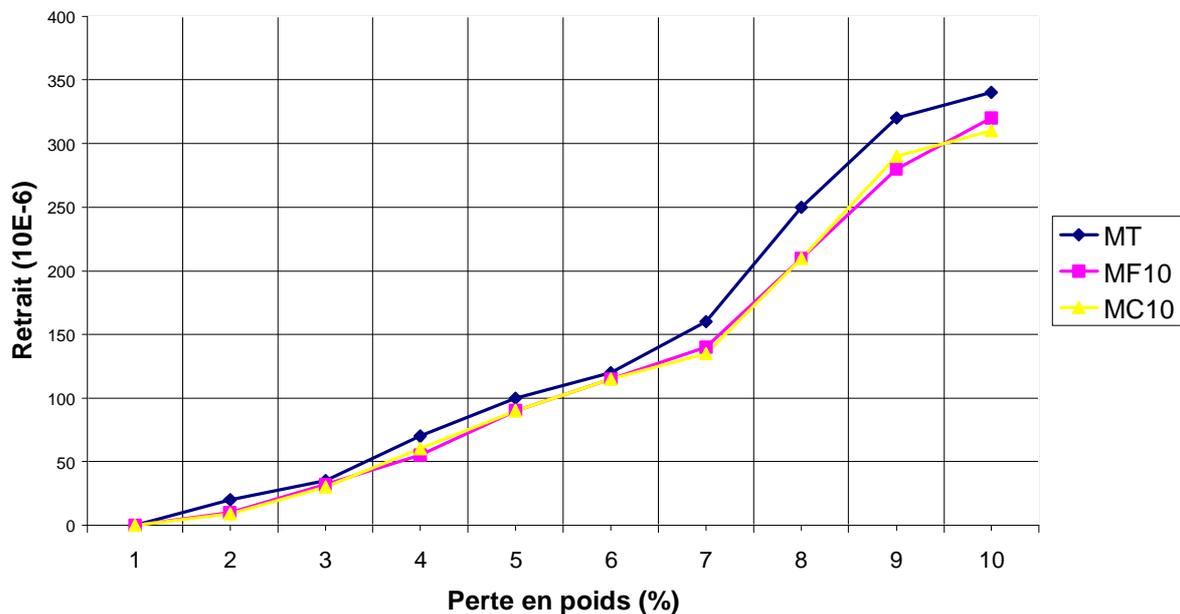


Fig : 4.29 Déformation de retrait en fonction du % de perte en poids

Dans ce paragraphe, nous mettons en relation la perte en poids (dessiccation) et le retrait. [85], [24], [86], constate que la perte en poids est plus grande pour les bétons de fibres que pour les témoins. Dans notre étude la même constatation est faite. [85] émet l'hypothèse que les fibres peuvent créer un chemin préférentiel pour le départ de l'eau. La figure (4.29) présente la déformation de retrait en fonction de la

perte en poids (en %) pour le mortier témoin et deux mortiers renforcés de fibres MF10 et MC10. Sur chacune des courbes obtenues il apparaît deux zones. [21] a obtenu la même relation sur pâte pure et interprète cette courbe en distinguant dans la première zone un retrait dû au départ de l'eau des capillaires et dans la deuxième zone un retrait dû au départ de l'eau des pores.

Ce phénomène des comportements permet de suggérer quelques explications sur l'effet de retrait mesuré en fonction du temps.

■ Le béton de fibres aurait une structure de matrice contenant plus de capillaires saturés en eau, et par contre des pores contenant moins d'eau. Ceci serait la cause principale du retrait différentiel observé entre témoin et les composites.

■ Pour nous, ces capillaires saturés se positionnent à l'interface fibre-matrice, ce qui explique la différence entre MF et MC, en effet les fibres MF ont une surface développée beaucoup plus grande ; ce qui a été constaté par [86].

L'hypothèse ainsi émise, à partir de constatations expérimentales mériterait un approfondissement spécifique.

4.4 Quelques Aspects de Durabilité

Il existe encore à l'heure actuelle un manque de données expérimentales pour traduire l'aspect caractérisant la durabilité du béton renforcé de fibres métalliques. Pour obtenir ces données, il convient d'effectuer un grand nombre d'essais. Ce sont des expériences qui prennent beaucoup de temps, et qui mobilisent le matériel de laboratoire. Pour le béton de fibres, s'ajoute deux difficultés supplémentaires : l'inexistence d'essais de référence qui permettent de traduire simplement les résultats de mesure et la sensibilité (peu quantifiable) des résultats liés aux problèmes de formulation.

On sait que le béton est un matériau durable et les ouvrages romains sont la meilleure preuve de cette qualité que le béton s'est approprié. Cependant, cette tenue du béton n'est pas garantie sans une connaissance approfondie de son comportement vis à vis des différentes agressions qu'il subit par environnement au cours du temps.

Il est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration auxquels il peut être exposé. On dit d'un tel béton qu'il a une bonne durabilité.

Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou phénomènes internes au béton. Les différentes actions peuvent être physiques, chimiques ou mécaniques) [92].

Le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apparaîtront. Pour cette raison, il est quelques fois difficile d'attribuer la détérioration à une cause particulière.

L'information que nous cherchons dans le cadre de notre étude est d'estimer les améliorations possibles du comportement des matériaux hydrauliques traditionnels (béton, mortier) grâce à l'ajout de fibres métalliques dispersées au hasard dans la matrice. La recherche est expérimentale et comparative en essayant de remplir au mieux les objectifs généraux que nous venons d'évoquer [93].

Les matériaux testés sont ceux présentés dans le chapitre précédent. Une caractérisation préliminaire du comportement mécanique a été réalisée. Leur capacité d'absorption d'eau en premier lieu, et de faire subir aux différents mélanges des cycles de mouillage-séchage (essais de vieillissement) et d'en apprécier le meilleur comportement.

Dans un premier temps, nous présentons le processus expérimental en précisant le mode d'essai et les caractéristiques des matériaux étudiés ainsi que le matériel utilisé.

La deuxième partie est consacrée à l'exposé des résultats obtenus en mettant en évidence l'influence des paramètres.

Les résultats observés intègrent une superposition : retrait + perte en poids propre. Il est clair, comme montré précédemment, que ces effets ne sont pas indépendants les uns des autres mais liés. La notion de vieillissement ne peut être définie par manque de connaissance entre les couplages physiques et mécaniques.

4.5 Rappel sur les matériaux et méthodologie d'essais

La modeste recherche bibliographique nous a permis de bien comprendre les différents phénomènes qui infligent au béton des dommages spécialement qui sont due à son environnement et d'en faire ressortir les paramètres influents.

Le programme expérimental établi dans notre laboratoire étudie le comportement à l'absorption capillaire et au vieillissement du matériau composite. Nous utilisons la

même formulation de mortier de fibres et les mêmes dimensions géométriques des éprouvettes, que celles définies au chapitre précédent.

4.5.1 Caractéristiques des matériaux expérimentés

Cette étude de durabilité du mortier renforcé de fibres métalliques a permis de tester cinq compositions différentes dont le témoin sans fibres. Les paramètres des fibres sont le type et le pourcentage des fibres qui sont étudiés séparément, tandis que les autres variables seront maintenues fixes, présenter dans le tableau 4.11

Tableau. 4.1	DESIGNATION	NOTATION
	1/ mortier témoin	MT
	2/ mortier renforcé de 1 % de fibres métallique industrielles	MF10
	3/ mortier renforcé de 2 % de fibres métallique industrielles	MF20
	4/ mortier renforcé de 1 % de fibres copeaux d'acier	MC10
	5/ mortier renforcé de 2 % de fibres copeaux d'acier	MC20

4.6 Essai de l'absorption capillaire

4.6.1 Objectif de l'essai

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable,

Tel est le cas des mortiers, qui grâce à leur capacité d'absorption d'eau, peut engendrer des

dommages internes au béton si celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures ou des milieux très humides.

Le béton aussi est un matériau poreux, qui a cette capacité d'absorption d'eau et qui peut nuire à sa durabilité si cette caractéristique est assez importante.

Dans cette étude, comme on a mesuré l'absorption capillaire d'eau, il convient d'opter sur un échantillon sec.

L'absorption capillaire est mesurée suivant le projet de norme européenne EN 480-5. Les éprouvettes de mortier (7 x 7 x 28), démoulés à vingt-quatre heures, sont

conservés pendant sept ou quatre-vingt dix jours, dans l'air à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $55\% \pm 5\%$ d'hygrométrie relative ; ils sont placés dans le sens vertical, leur base inférieure étant immergée sur une hauteur de 3 ± 1 mm dans l'eau, après avoir pris soin d'enrouler la partie non immergée dans du papier aluminium.

Le but recherché est de mettre en évidence l'influence éventuelle de la nature et la teneur des fibres sur l'absorption capillaire.

Donc, dans cet essai, on déterminera justement la grandeur de cette capacité d'absorption d'eau pour les différents mélanges et de distinguer les paramètres influents sur cette caractéristique.

4.6.2 Equipement nécessaire

- Une salle dont la température est maintenue à $(20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$ et l'humidité relative à $55\% \pm 5\%$).
- Un bain d'eau dont la température est maintenue à (20°C) .
- Etuve qui peut nous fournir des températures très élevées.
- Balance.
- Séchoir

4.6.3 Principe de l'essai

Après avoir conservé les éprouvettes dans une atmosphère ambiante (salle dont la température est maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) et l'humidité relative à $(55\% \pm 5\%)$ pendant 28 jours, on les a disposés à l'intérieur de l'étuve à une température de 105°C jusqu'à séchage total (avoir un poids constant de l'éprouvette) et on les a pesés qu'on notera M_{SEC} .

Puis, on a plongé les éprouvettes des différents mélanges dans les bains d'eau (couche de 3 mm au dessus), la partie supérieure couverte par le papier aluminium afin de diminuer l'absorption du milieu ambiant. Après 48 heures, le temps de la saturation.

Avant chaque mesure les éprouvettes sont soumises à un flux d'air chaud. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau de l'intérieur, avec une pesée de la masse de l'éprouvette immergée, qu'on notera M_{SAT} . L'essai est réalisé dans un dispositif mis au point au LMDC sur des échantillons de dimensions de 7 x 7 x 28 cm.

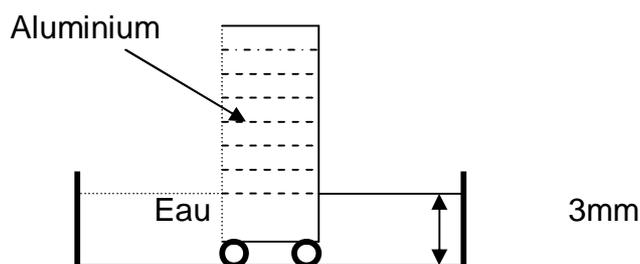


Schéma du dispositif pour l'absorption capillaire

Les différentes étapes de l'essai sont résumées dans le tableau suivant 4.15

Tableau. 4.11 Essai d'absorption capillaire

N° d'ordre	Types de mélange	Nbre de Pièces	Corps d'épreuve	Conservation T°C, HR%	Mesure effectuées	Mesure effectuées	Age de mesure
2	5	5	7x7x28	105°C jusqu'à poids constant puis : 20°C, 100% pendant 48 heures	Poids sec	Poids saturé	28 jours

4.6.4 Résultats et commentaires

Le coefficient de l'absorption capillaire est donné par la formule suivante

$$AC\% = (M_{SAT} - M_{SEC} / M_{SEC}) \times 100$$

Où ;

M_{SAC} : masse de l'éprouvette sèche après passage à l'étuve à 105°C

M_{SAT} : masse de l'éprouvette immergée dans l'eau

Pour un même type de fibres, et d'après la forme ondulaire, on remarque que l'absorption en fonction du temps pour 1% de fibres est plus lente que pour 2% de fibres.

La figure 4.35 nous montre que l'absorption pour les deux types de fibres ou pour une même teneur, dans les deux cas est quasiment égale.

Le coefficient d'absorption moyen est nettement plus élevé qu'avec la teneur de 2% de fibres.

On peut remarquer sur la courbe, que la capacité d'absorption d'eau croît rapidement dans les premières minutes (0 – 30min). Au-delà, elle croît très lentement pour devenir éventuellement stationnaire.

On peut conclure que la nature (teneur) des fibres a tendance à guider l'eau dans le sens longitudinal et cela pour des faibles pourcentages de fibres.

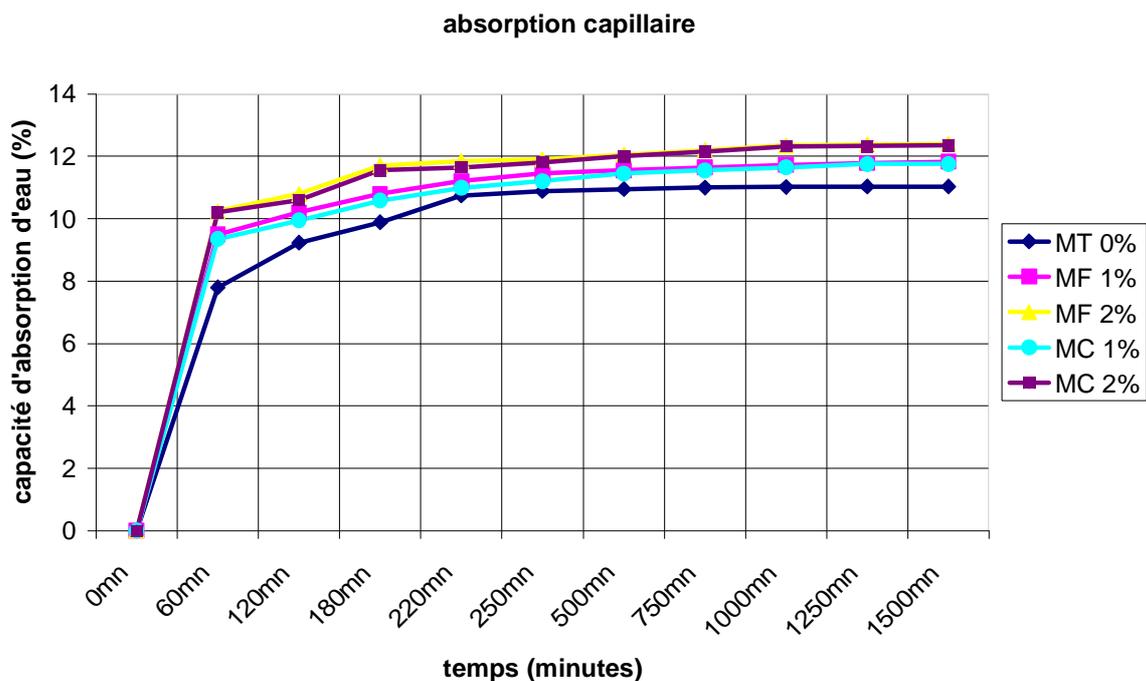


Fig : 4.30 Variation de l'absorption d'eau en fonction du temps

A) Influence de la teneur en fibres

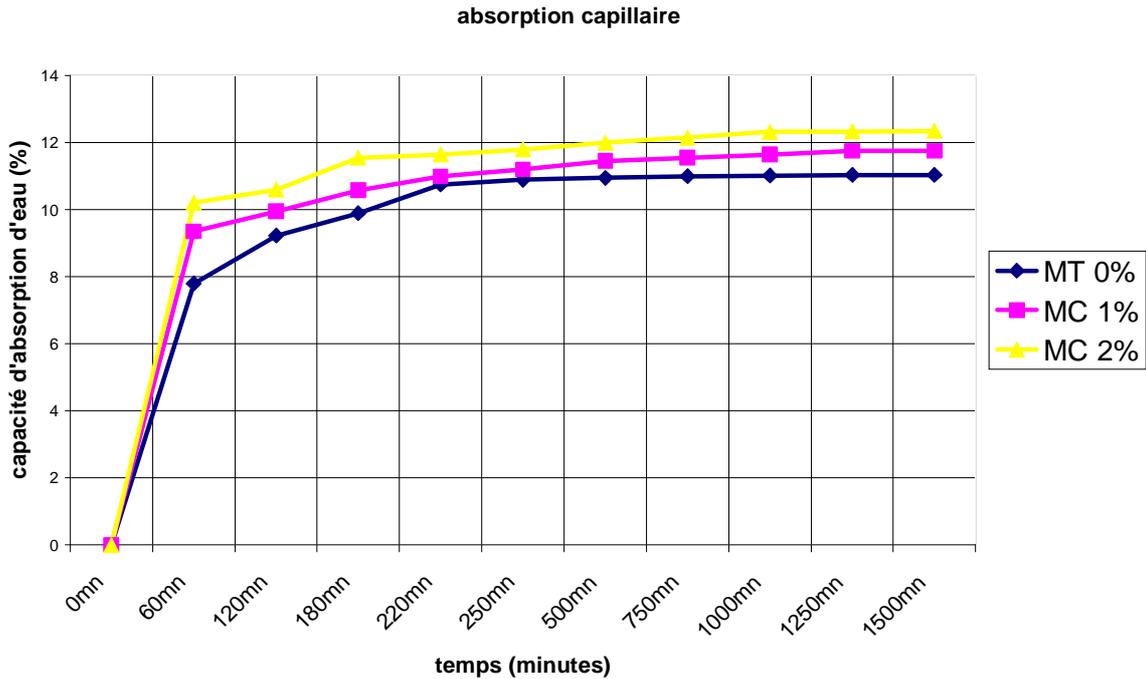


Fig : 4.31 Influence de la teneur de fibres sur l'absorption capillaire (MC)

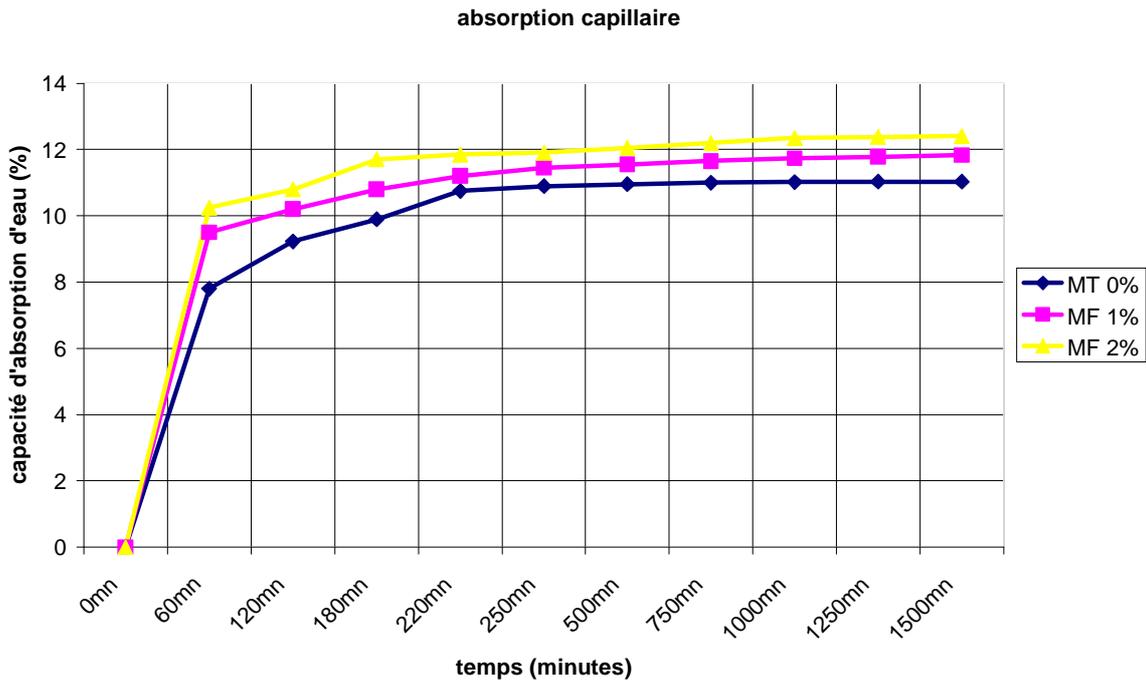


Fig : 4.32 Influence de la teneur de fibres sur l'absorption capillaire (MF)

On remarque que la capacité d'absorption d'eau du mortier augmente avec l'augmentation de dosages de fibres métalliques. Ainsi l'introduction de fibres dans le mortier se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau, nos résultats vont dans le même sens ceux des travaux de [85].

B) Influence du type de fibres

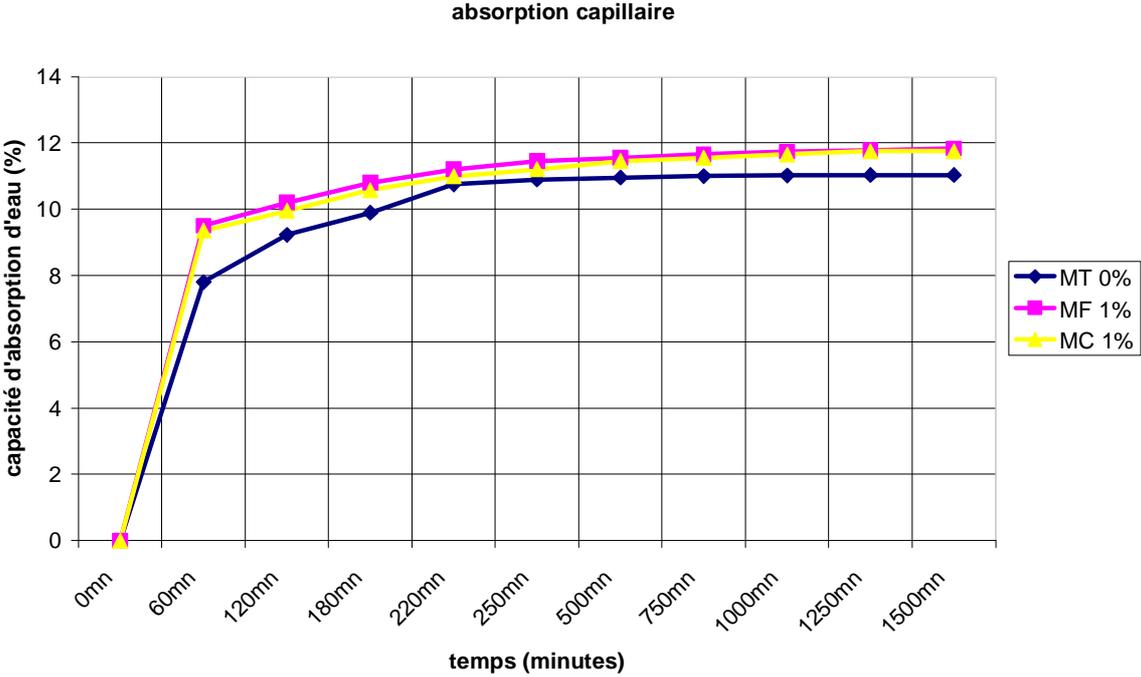


Fig : 4.33 Influence du type de fibres sur l'absorption capillaire à 1%

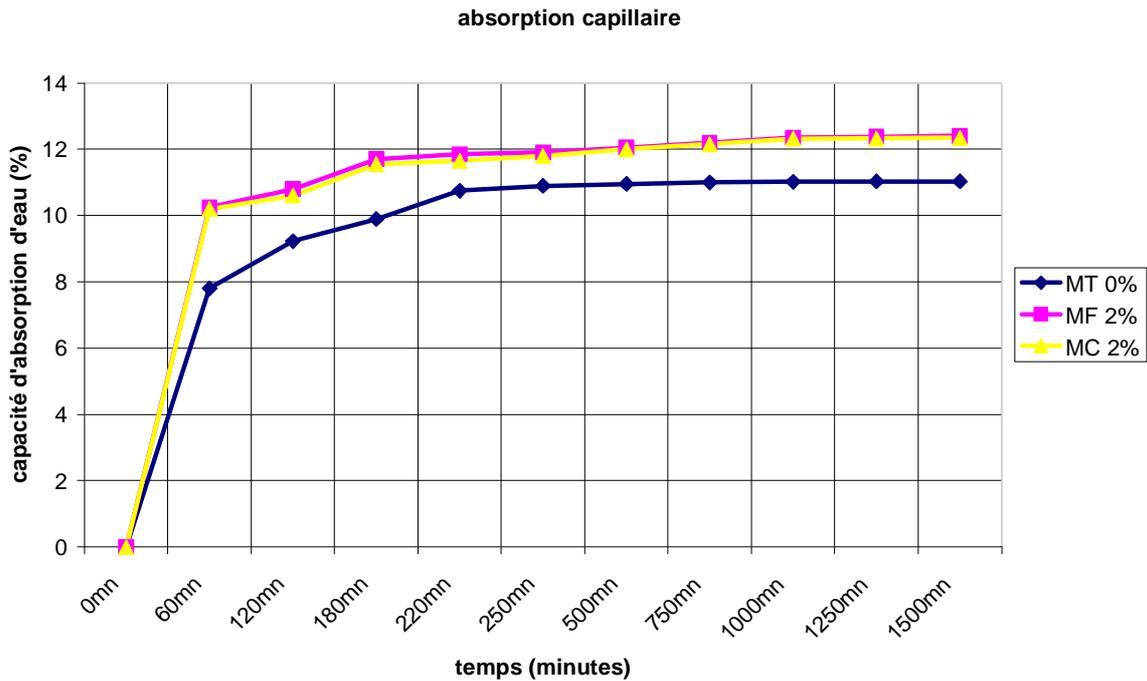


Fig : 4.34 Influence du type de fibres sur l'absorption capillaire à 2%

4.6.5 Conclusion

La teneur et la forme des fibres influenceront le taux de migration de l'humidité dans le béton, et influenceront par conséquent le taux du retrait. Les résultats des essais montrent que les éprouvettes avec une proportion volume de 2%, c.a.d. chemin de diffusion important, développent leur contrainte de retrait plus rapidement et atteignent leur retrait final dans un temps court [61].

Les conclusions de cette étude peuvent être tirées comme suit :

1. D'une haute teneur en fibre peut résulter un retrait plus bas. Cet effet est plus distingué lorsque le temps de la durée augmente.
2. Pour une similaire teneur de la fibre, une grande proportion d'aspect des fibres résultera à bas retrait ; cet effet est plus distingué lorsque le temps de la durée du retrait augmente. Ce comportement peut être constaté dans les expériences et montré par le modèle de nos essais.

3. Lorsque l'âge du béton augmente, le béton sera graduellement solidifié et abouti à une haute solidité. Pendant ce temps, la force de lien sur la limite entre la fibre et la matrice se solidifie aussi, et la capacité de contrainte du retrait due aux fibres augmente graduellement avec l'augmentation de la période d'exposition.

4. Basées sur la fraction du volume des fibres d'acier, les éprouvettes de béton qui contiennent une grande fraction donnent un retrait moindre sous les conditions de séchage. La fraction de volume optimal des fibres d'acier pour réduire le retrait ne peut dépasser 2%.

4.7 Essai de vieillissement

4.7.1 Objectif de l'essai EN 481-5

Il consiste à évaluer les résistances à la traction des éprouvettes des différents mélanges qui ont subi cinq cycles de mouillage –séchage et comparer avec les résistances à la traction d'éprouvettes des mêmes mélanges conservées dans l'eau prises comme témoin.

4.7.2 Equipement nécessaire

- Une salle dont la température est maintenue à $(20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$ et l'humidité relative à $55\% \pm 5\%$.
- Un bain d'eau dont la température est maintenu à (20°C) .
- Etuve qui peut nous fournir des températures très élevées.
- Balance.
- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges importantes.

4.7.3 Principe de l'essai

Après avoir conservé les éprouvettes dans une atmosphère ambiante (salle à température est maintenue à $(20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$ et l'humidité relative à $(55\% \pm 5\%)$ pendant 28 jours, on les a disposé à l'intérieur de l'étuve réglée à une température de 105°C pendant 4 heures jusqu'à séchage total. Puis, immersion dans l'eau à une température ambiante (20°C) pendant environ 4 heures.

On fait plusieurs cycles de mouillage séchage (au moins cinq cycles, et c'était notre cas).

En dernier lieu, on a effectué pour toutes les éprouvettes l'essai de traction par flexion pour déterminer leur résistance à la traction ainsi que les éprouvettes témoins qui ont été conservées dans l'eau.

Les différents étapes de l'essai sont résumées dans le tableau suivant 4.12.

Tableau. 4.12 : Essai de vieillissement (mouillage séchage)

N° d'ordre	Type de mélange	Nbre de Pièces	Corps d'éprouve	Conservation T°C, HR%	Nbre de cycles	Type d'essais	Age de mesure
1	5	5	7x7x28	105°C 20°C, 100%	5 : la durée de chaque cycle est au moins 8 heures	traction / flexion	28 jours

4.7.4 Résultats et commentaire

Influence des différents paramètres :

- Effet des cycles de mouillage – séchage sur la résistance à la traction des différents mélanges :

On remarque sur les histogrammes et quel que soit le type et la quantité des fibres métalliques utilisées, la résistance à la traction de tous les mélanges a chuté comparée à celle des éprouvettes témoins.

On peut quantifier cette importante réduction de la résistance en calculant le rapport des résistances à la traction, on le définit comme étant :

$$K_{dur} = R_{dur} / R_{sat} \cdot 100$$

Avec :

R_{dur} : résistance du mélange à la traction après avoir subit les cinq cycles de mouillage séchage.

R_{sat} : résistance du mélange à la traction conservé dans l'eau.

Le tableau suivant 4.13 résume les différentes valeurs de K_{dur} pour les différents mélanges.

Mélanges Résistances	Résistance de traction (vieilliss) R_{dur}	Résistance de traction (saturée) R_{sat}	K_{dur}
MT	7.50	8.50	88.20%
MF 10	6.70	7.35	91.15%
MF 20	8.80	9.80	89.79%
MC10	8.30	9.80	84.69%
MC20	6.10	6.73	90.63%

A) Influence du type de fibre

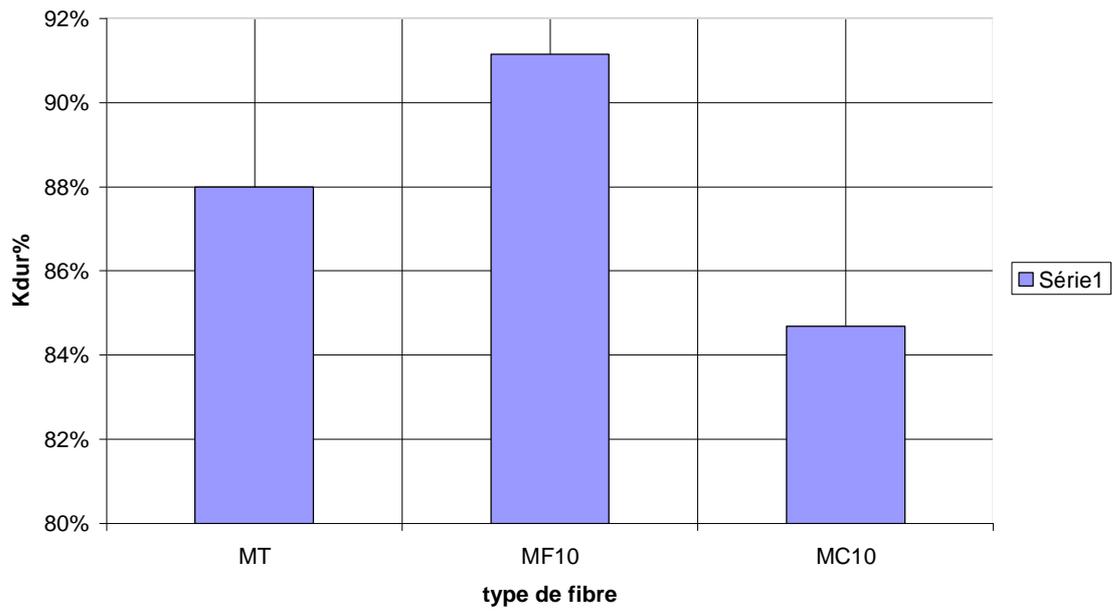


Fig : 4.35 Influence du type de fibres sur le vieillissement des mélanges (MT, MF, MC à 1%)

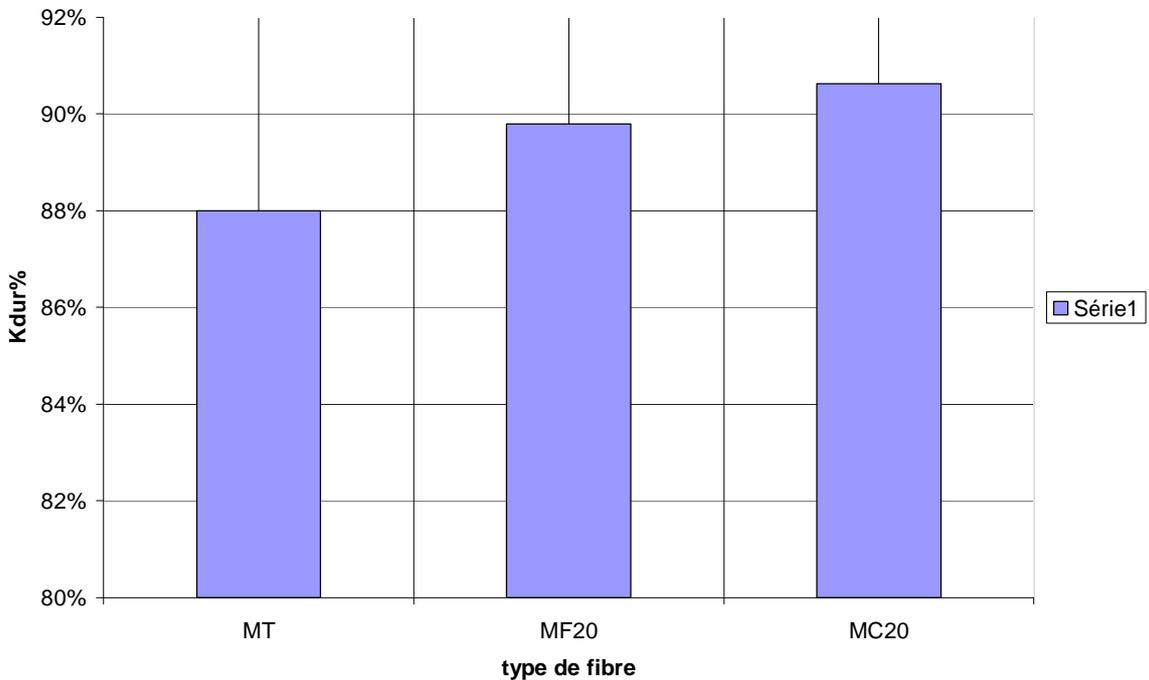


Fig : 4.36 Influence du type de fibres sur le vieillissement des mélanges (MT, MF, MC à 2%)

B) Influence du pourcentage de fibres

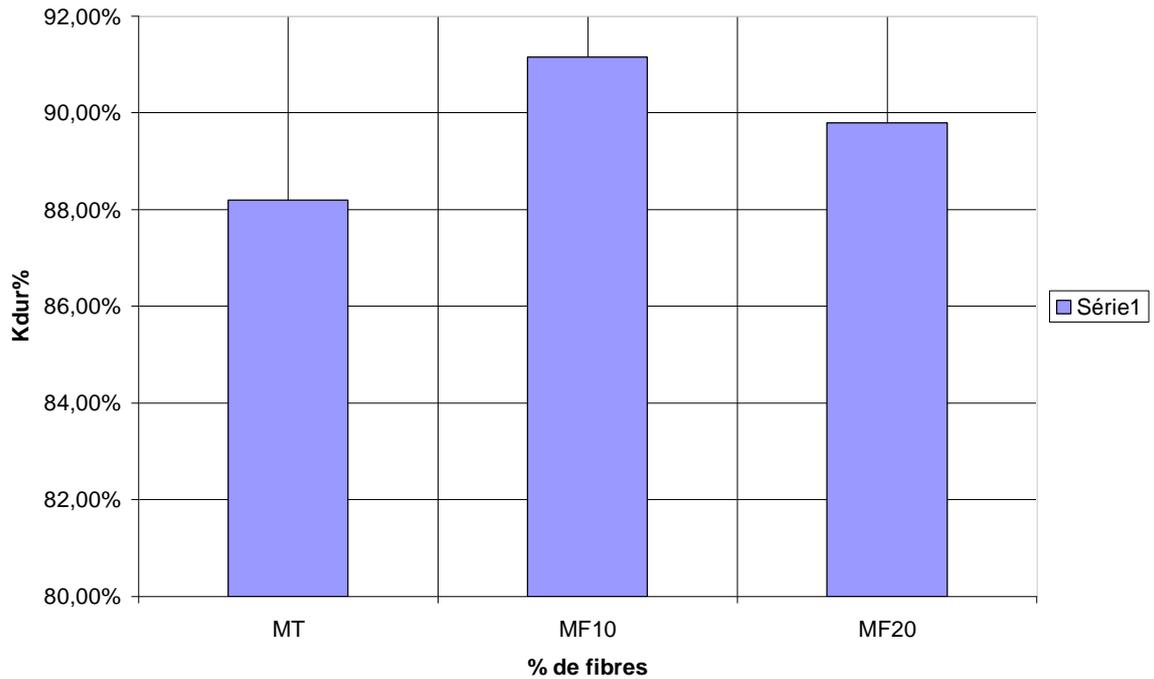


Fig : 4.37 Influence du pourcentage de fibres sur le vieillissement des mélanges (MT, MF à 1% et MF à 2%)

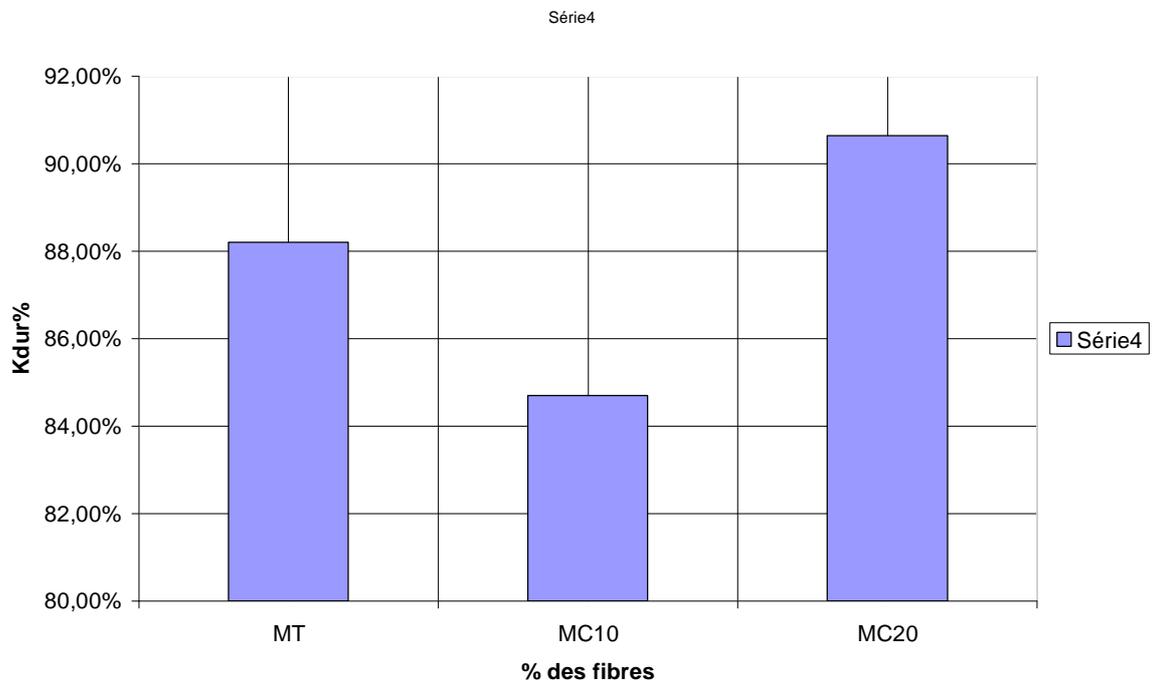


Fig : 4.38 Influence du pourcentage de fibres sur le vieillissement des mélanges (MT, MC à 1% et MC à 2%)

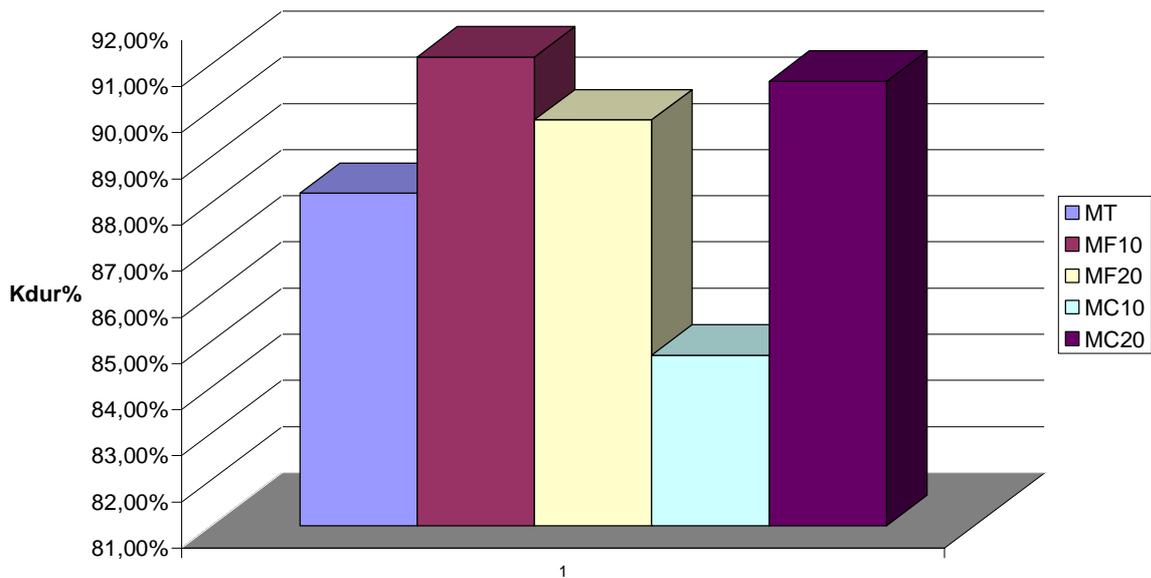


Fig : 4.39 Récapitulatif des bétons de fibres métalliques sur le vieillissement

Les figures 4.35 à 4.39, montre nettement l'influence de la variation de la quantité de fibres lors de la préparation des mélanges sur la résistance à la traction des différents mélanges qui ont subit le cycles de mouillage séchage.

■ On remarque que pour les fibres industrielles plus le % de volume de fibres augmentent plus la résistance à la traction diminue, et ceux vu la forme des fibres qui tendent à en magasiner beaucoup plus d'eau, cela confirme les recherches antérieures [47], [50] qui disent que chaque fois qu'on augmente la quantité d'eau de gâchage on obtiendra un mortier moins résistant aux cycles de mouillage-séchage.

■ Pour les fibres copeaux dont la forme est roulé plus le % de volume de fibres est grand plus la résistance est élevée, vu que ce type de fibres jouent le rôle de gravier pour les mélanges donc la résistance elle a tendance à augmenté.

4.8 Conclusion

Une augmentation des fibres distribuées hasardeusement peut contribuer à augmenter la raideur dans la matrice du ciment à travers leur effet de joint et réduire le retrait des éprouvettes.

Cet effet peut être remarqué dans les résultats expérimentaux et les résultats de prévision montrés de nos essais. On peut aussi observer que les fibres en acier deviennent plus effectives en retenant le retrait du béton quand la durée de séchage de l'essai augmente. La réduction du retrait à des âges tardifs peut être en partie attribuée à l'effet de tension de confinement dû au développement des tensions de retrait non équilibrées [85], [91].

La pression de confinement augmente la force de lien de la fibre et ainsi résulte une réduction de retrait.

Afin de comprendre l'efficacité de la fraction du volume des fibres mélangées à retenir le retrait du béton, les éprouvettes à teneur de volume très haut de 2% sont utilisées et assumées hypothétiquement à la limite finale de la teneur de volume de renforcement pour réduire le retrait.

Les résultats des essais montrent la tension de retrait contre la teneur de la fibre à une durée de séchage de 90 jours pour des éprouvettes commençant leurs essais de séchage à un âge de 7 jours. On peut voir que la plupart de la fraction de volume des fibres effectives pour réduire le retrait est égale ou inférieure à 2%.

On déduit que l'effet d'ajouter plus de fibres pour réduire le retrait cesse quand la teneur des fibres atteint la limite de 2%. Le résultat de la prévision indique également cette propriété ; cette déduction est déjà proposée par [92].

Les fibres sont faites de différentes formes et tailles ; la forme des fibres est conçue pour augmenter le frottement et la solidité du lien. Il a été constaté que la solidité et le comportement de la déformation dépend sur la proportion d'aspect de la fibre [87], [92].

Les courbes montrent l'assez bon accord entre les courbes expérimentales et les courbes de prévision du temps de retrait pour les bétons faits de fibres avec des proportions d'aspect différents.

Cela est exprimé d'avantage dans les différents modes, que la conservation n'a pas beaucoup d'effet sur le retrait des mortiers, qui montrent que la tension de retrait à 90 jours n'a pas varié d'après le milieu [93].

CONCLUSION GENERALE

Dans cette recherche, nous rappelons d'abord quelques problèmes liés à l'élaboration du matériau :

- ☐ Sous l'appellation bétons de fibres il existe une grande famille de matériaux différents ;
- ☐ La présence des fibres provoque une chute importante de l'ouvrabilité du mélange, baisse qui découle de plusieurs facteurs tels que : la nature des fibres, forme géométrique, l'adhérence de l'interface fibre-matrice, le pourcentage...
- ☐ Les comportements liés à l'introduction des fibres sont compliqués et difficiles à isoler à cause des interactions entre la structure de la matrice et le renforcement.
- ☐ La mise en œuvre et les pourcentages des fibres introduites influencent les effets bénéfiques des fibres. Ces derniers induisent aussi des défauts dans la matrice, dont les effets doivent rester négligeables.

La première partie de l'étude bibliographique résume les propriétés connues de ce matériau. Il apparaît aussi que peu d'informations et de travaux sont données sur les caractéristiques rhéologiques (retrait, durabilité...) de ce composite. Alors plusieurs questions peuvent surgir afin de contribuer à l'application de ce matériau dans un domaine plus vaste. C'est sur ce point que notre étude tend à apporter quelques éléments.

En rappelant le cadre de l'étude nous précisons que pour la confection des mortiers renforcés de fibres nous utilisons deux méthodes très différentes de renforcement de la matrice. Dans un cas des fibres d'acier industrielles bien ancrées par leur forme ondulées MF sont introduites dans la matrice, dans l'autre des fibres copeaux d'usinage MC présentant de bonnes propriétés mécaniques et physiques associées à une géométrie tubulaire qui leur donne une très grande surface spécifique. Le pourcentage volumique de renforcement est de 1% et de 2 % notre choix est en fonction des travaux ultérieurs, où les chercheurs en générale ne dépassent pas un pourcentage de volume de 1.5 % car plusieurs phénomènes de confection peuvent surgir (comme formation d'oursin). Les mélanges ont été formulés avec un même critère de maniabilité à l'état frais, mesuré sur un

maniabilimètre L.C.L à mortier. Un fluidifiant est associé aux mortiers de fibres ; il est montré que celui-ci n'a pas d'influence sur le retrait et la dessiccation du matériau. D'où l'intérêt du fluidifiant qui donne un supplément d'ouvrabilité au mélange sans entraîner de réduction de sa compacité (air occlus).

L'ensemble des essais que nous avons effectués sur le comportement mécanique du mortier renforcé de fibres métalliques nous a conduit à présenter les conclusions suivantes :

En premier lieu, l'apport des fibres métalliques sur les caractéristiques mécaniques sous sollicitation statique a donné :

On peut dire que les fibres d'acier n'apportent pas d'amélioration en compression, elle est de l'ordre de 3%, tout en améliorant la ductilité des éprouvettes. L'ouverture des fissures étant freinées par la l'arrachement des fibres.

Pour la résistance à la traction, la présence des fibres améliore la résistance à la traction. Cette amélioration n'est pas très importante, seulement 7% pour le mortier MF10 et MC10, et 9 % pour le mortier MF20 et MC20 à 7 jours.

Il est important de noter que les charges de ruptures et de fissurations sont très distinctes avec les fibres copeaux et très proches pour les fibres industrielles ondulées. Ceci traduit une différence de comportement entre les deux types de composites.

L'étude rhéologique intègre la prise en compte du facteur temps et du mode de conservation autorisant le séchage. Bien sûr des couplages existent entre les actions physiques et mécaniques susceptibles de se développer dans les éprouvettes. Ceux-ci ne sont pas mis en évidence.

La démarche suivie a consisté à observer le phénomène de retrait sans déformation mécanique, dans plusieurs modes de conservation.

Le retrait des mortiers fibres métalliques est moins importants que celui observé sur la matrice témoin, et se stabilise plus tôt dans des conditions d'environnement

maintenues stables. Cette réduction est de 29 % pour les fibres industrielles MF et de 23 % pour les fibres copeaux.

Nous avons noté que les fibres métalliques industrielles accélèrent un peu le départ de l'eau donc la perte en poids en est beaucoup plus nette pour les fibres industrielles que les fibres copeaux, vu l'élançement et la forme ondulée des fibres industrielles. Les fibres pourraient créer un chemin préférentiel favorisant le flux de vapeur d'eau. Cela expliquerait les meilleures performances des fibres MC qui se dispersent en plus grand nombre dans la matrice à cause de leur faible volume unitaire. L'observation des différences dans la cinétique de séchage entre le matériau renforcé de fibres métalliques et le non renforcé de fibres suggère en complément qu'il pourrait y avoir dans la composite plus de capillaires saturés en eau et des pores contenant moins d'eau. Ceci est susceptible d'avoir des conséquences directes sur la valeur de la déformation de retrait atteinte à l'équilibre. Les fibres s'opposent à la fissuration provoquée par ce phénomène. Le retrait du béton, qui est provoqué par la perte de l'eau pendant le séchage, est en partie empêché par les fibres.

On constate qu'à très jeune âge le mortier renforcé de fibres perd plus d'eau presque le double que le mortier témoin, cela est dû sans doute à la forme des fibres (ondulé) qui favorise le départ de l'eau par un chemin tracé dans la structure poreuse du mortier ; dans le mortier témoin l'eau se trouve piégée (emprisonnée). Plus la quantité de fibres augmente plus la perte en poids augmente. Au-delà de cette échéance on remarque que la perte en poids se stabilise.

La perte en masse est aussi importante comme dans le cas du retrait dans les premiers jours et devient par la suite presque constante, ce qui met en évidence l'influence du type de fibres et le pourcentage volumique des fibres sur la dispersion des résultats.

Dans cette analyse, nous mettons en relation la perte en poids (dessiccation) et le retrait. [2], [24], [3], constate que la perte en poids est plus grande pour les bétons de fibres que pour les témoins. Dans notre étude la même constatation est faite. La déformation de retrait en fonction de la perte en poids (en %) pour le mortier témoin et deux mortiers renforcés de fibres MF10 et MC10, laisse apparaître deux. On

distingue dans un retrait dû au départ de l'eau des capillaires et un retrait dû au départ de l'eau des pores.

Ce phénomène des comportements permet de suggérer quelques explications sur l'effet de retrait mesuré en fonction du temps.

■ Le béton de fibres aurait une structure de matrice contenant plus de capillaires saturés en eau, et par contre des pores contenant moins d'eau. Ceci serait la cause principale du retrait différentiel observé entre témoin et les composites.

■ Pour nous, ces capillaires saturés se positionnent à l'interface fibre matrice, ce qui explique la différence entre MF et MC, en effet les fibres MF ont une surface développée beaucoup plus grande.

D'une manière générale, on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement de la forme des éprouvettes, du type d'essais, des paramètres liés à la géométrie et au pourcentage volumique des fibres utilisées.

L'hypothèse ainsi émise, à partir de constatations expérimentales mériterait un approfondissement spécifique.

- L'essai de l'absorption capillaire met en lumière une grande sensibilité du composite. Les résultats ont démontré la capacité d'absorption d'eau croit rapidement dans les premières minutes (0 – 30min). Au-delà, elle croit très lentement pour devenir éventuellement stationnaire.

On peut conclure que la nature et plus particulièrement les fibres industrielles, amplifient le phénomène et que la capacité d'absorption d'eau du mortier augment avec l'augmentation de dosages de fibres métalliques. Ainsi l'introduction de fibres dans le mortier se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau.

- Une sensibilité du composite plus importante aux effets de vieillissement (mouillage – séchage) par rapport à la matrice cimentaire, se traduit par la diminution de résistance à la traction avec l'augmentation des fibres, et particulièrement les fibres industrielles qui tendent à en magasier beaucoup plus d'eau.

Pour les fibres copeaux dont la forme est roulé plus le % de volume de fibres est grand plus la résistance est élevée, vu que ce type de fibres jouent le rôle de gravier pour les mélanges donc la résistance a tendance à augmenter.

Il peut être conclu que l'introduction de fibres métalliques dans le béton améliore les caractéristiques rhéologiques de la matrice. Nous avons montré les difficultés qu'il y avait à quantifier ces améliorations. Conscient que cette étude s'insère dans un cadre limité, elle s'est attachée à préciser les comportements phénoménologiques. Les résultats obtenus sont susceptibles d'élargir le champ des applications de ces matériaux renforcés de fibres métalliques.

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

- Prendre en compte une éventuelle réponse mécanique au comportement hydrique du matériau.
- Tenir compte de l'évolution de la microfissure pour expliquer les transferts d'humidité à l'échelle microscopique.
- Les copeaux métalliques ayant la même forme que les particules de ciments, cela permet une meilleure circulation de l'eau et rendent le matériau plus ductile.
- La forme des fibres est un paramètre important qui influe sur le comportement pondéral du matériau. Elle permet une meilleure accommodation du matériau au retrait.

Perspective de recherche

A partir du travail accompli, on dispose désormais d'une connaissance approfondie du comportement mécanique et d'une compréhension des variations dimensionnelles. Il reste que le passage d'un matériau de laboratoire vers un composite industriel nécessite une maîtrise des procédés de mise en œuvre ; ceci afin de contrôler l'orientation préférentielle des fibres. L'effort de recherche doit principalement porter sur les deux points suivants :

- Les écoulements de matrices fibrées afin de prédire d'une part la réparation des fibres dans la structure et d'autre part d'optimiser la géométrie des coffrages et des procédures de mise en œuvre.
- Le développement de cette catégorie de matériau ne peut se faire, du moins dans un premier temps, qu'au sein de l'industrie de la préfabrication. Il convient alors de réfléchir à la définition d'assemblages mécaniques performants pour liasonner entre eux les éléments structuraux constitutifs de l'ouvrage à réaliser.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A.C.I.**, An International Symposium: Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute, USA, (1974), Publication SP-44, 54, 4p.
- [2] **A.C.I.**, Committee 215 “Considerations for design of concrete structures subjected to fatigue loading”, A.C.I Journal, 1974 march, pp 97-121.
- [3] **A.C.I.**, Committee 506 “State of the art report on fiber reinforced concrete” Concrete International and Design and Construction, 1984, vol. 6, N°12, pp. 15-27.
- [4] **KEER. HANNANT D.J.**, “Fibre cements and concretes New York: J. Wiley and Sons, 1978” pp.125-135.
- [5] **DARDAR 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
- [6] **REHNSTROM A., BHARGAVA J.**, « Dynamic Strength of Polymer modified and fiber reinforced concrete cement and research », 1977
- [7] **HANNANT D.J.**, « Fibre cements and concretes New York: J. Wiley and Sons, 1980, pp.115-125.
- [8] **ALI M.A , MAJUMADAR J. , SING B.** : « Properties of glass fiber cement , the effect of fiber length and content. » , J. Matr. Sci . October 1975.
- [9] **BALAGURU P., RAMAKRISHNAN**, Fibre reinforced concrete properties: Workability-Behaviour under long term loading-and Air-Void Characteristics, 1987, Vol.20, N°118, pp. 283-292
- [10] **JAMROZY Z. , SLIWINSKI J.** Technologie et propriété du béton centrifugé armé de fibres d'acier , Matériau et construction 1979.
- [11] **JOHNSON C.D. , COLEMAN R.A.**, « Strength and deformation of steel fiber reinforced mortar in uniaxial tension. », American Concrete Institute Publication 1974.
- [12] **RITCHIE A.G.B., RAHMAN A.T**, The effect of fiber reinforcement on the rheological. Properties of concrete mixes. ACI International Symposium, SP 44-2, pp.44
- [13] **HAMELIN P., DEBICKI G., CLASTRE M., BOUCHEKOUK**, « Caractérisation des bétons de fibres. », INSA Lyon, 1987.

[14] **SWAMY P.N., MANGAT P.S.**, « Influence of fiber aggregate interaction, on some properties of steel fiber reinforced concrete. », France, Oct. 1974.

[15] **SWAMY P.N.**, Fiber reinforced cement and concrete, Materials and Structures, 1975, Vol. 8, N° 45, pp. 235 - 254

[16] **EDGINGTON J., HANNANT D.J., WILLIAMS R.I.T.**, Steel fiber reinforced concrete. », G.B. Building 1974

[17] **SWAMY P.N.**, Flexural creep of fiber reinforced cement composites, International Journal of cement composites, France, Oct. 1974.

[18] **DEHOUSSE N., LEJEUNE A., CUYRENS T.**, Les mortiers et bétons renforcés de fibres d'acier. », Belgique, 1974.

[19] **WANG Y. BACKER S.**, Toughness determination for fibre reinforced concrete, International Journal for Cement Composites and Lightweight Institute, 1990, vol, 87, N°1, pp. 461-468

[20] **BONZEL J. SMCHMIDT M.**, Distribution and orientation of steel fibers in concrete and their influence on characteristic of steel fiber concrete, Sheffield, 1986.

[21] **LEGRAND M.** C.E.T.U. Centre d'étude des tunnels BRON FRANCE.

[22] **JAMROZY Z., SLIWINSKI J.** Technologie et propriété du béton centrifugé armé de fibres d'acier, Matériau et construction 1979.

[23] **ROMUALDI, BATSON G.**, Mechanic of crack arrest in concrete », Journal of Engineering Mechanics, Proceedings ASCE, USA, June 1963, Vol. 89, N°EM 3, pp. 147-168.

[24] **BONZEL J. , SMCHMIDT M.**, Distribution and orientation of steel fibers in concrete and their influence on characteristic of steel fiber concrete, .Sheffield, 1986.

[25] **SWAMY. R.N, STRAVRIDES. H:** Some properties of high workability steel fiber concrete. Sheffield 1975.

[26] **MANGAT P.S, AZARI M.M** A theory for the free shrinkage of steel reinforced cement matrices, Journal of Materials Sciences, 1984, Vol. 19, pp.2183-2194

[27] **JOHNSTON C., ZEMPR**, Flexural fatigue performance of steel fiber reinforced concrete. Influence of fiber content. Aspect ratio and type, ACI Materials Journal, 1991 Vol.88, N°4, pp. 374-383.

[28] **SERNA-ROS P.** : Etude de la contribution de fibres métalliques à l'amélioration du

comportement du béton au cisaillement. E.N.P.C 1984.

[29] **LEGRAND M.**, C.E.T.U. Centre d'étude des tunnels BRON FRANCE.

[30] **ROSSI P. , HAROUCHE N. , BELLOC A. :** Méthode de composition de béton armé de fibres métalliques. 1989

[31] **HOUARI H., DEBICKI G., CLASTRES P,** Flexural Fatigue Performance of metal reinforced mortar, The Third Beijing International Symposium on Cement and Concrete, Beijing, China, 27-30 October 1993, Libya, 12 P.

[32] **DEBICKI G.**, Contribution à l'étude du rôle des fibres dispersés anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement- les critères de résistance et la fissuration du matériau, Thèse d'état : I.N.S.A de Lyon, 1988, 360p

[33] **MANGAT P.S, AZARI M.M,** A theory for the free shrinkage of steel reinforced cement matrices, Journal of Materials Sciences, 1991, Vol. 19, pp.2183-2194

[34] **CABRILLAC R. & al,** Etude des possibilités d'utilisation du bambou dans les bétons de fibres. Communication Symposium International RILEM Salvador Bahia sept 1990

[35] **DEHOUSE.**, Méthode d'essais et caractéristiques mécaniques des bétons armés de fibres, Fiber reinforced cement and concrete, RILEM Symposium 1975 Edited by A.NEVILLE , Lancaster Construction Press., 1975, pp 119-136

[36] **BARON. J, LESAGE. R :** compacité maniabilité des bétons .Rapport de recherche LCPC, 1993

[37] **JAMROZY Z. , SLIWINSKI J. :** Technologie et propriété du béton centrifugé armé de fibres d'acier, Matériau et construction 1995.

[38] **EDGINGTON J., HANNANT D.J., WILLIAMS R.I.T.,** « Steel fiber reinforced concrete. », G.B. Building 1974.

[39] **SWAMY P.N., MANGAT P.S.,** Influence of fiber aggregate interaction, on some properties of steel fiber reinforced concrete, France, Oct. 1974.

[40] **SERNA-ROS P. :** Etude de la contribution de fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement. E.N.P.C 1984.

[41] **MOENS J.E.C,** Steel fiber concrete mix, proportioning, Philadelphia, Paper presented at A.C.I. Convention, Mars 1976.

[42] **ROSSI P.,** Les bétons de fibres métalliques : Presse du Laboratoire des ponts et

chaussées, 1998, pp 279-302

[43] **NEVILLE. A. M.**, Properties of concrete, editions J. Wiley and Sons, p. 398- 405, London 1983

[44] **LE CHATELIER. H.**, Sur le changement de volume qui accompagne le durcissement des ciments, Bulletin de la société de l'encouragement pour l'industrie nationale 5^{ème} série, tome 5, pp 54-57 1900

[45] **SIERRA. R.**, Contribution à l'étude de l'hydratation des silicates calciques hydrauliques. Rapport de recherche N° 39. LCPC, Septembre, 1974

[46] **COQUILLAT. G.**, Mesures fondamentales sur éprouvettes : Définition et méthodes expérimentales, Annales de l'ITBTP, N° 455, Juin 1987

[47] **ACKER. P.**, Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physicochimique, Rapport de recherche N° 152 p.117, LCPC, 1988

[48] **MITANI. H.**, Retrait endogène de BHP et BTHP aux jeunes âge, rapport de stage au LERM, DEA-MAISE, ENS Cachan 1999

[49] **ACKER. P.**, Retrait et fissuration du béton. Association française pour la construction, pp 10 - 40 1992

[50] **NEVILLE & al.** Creep of plain and Structural Concrete, Construction Press, Longman Group Ltd 1983

[51] **FOLLIOT. A & al.**, La structuration progressive de la Pierre de ciment, le béton hydraulique Paris, presse de l'ENPC sous la direction J. BARON et R. SAUTEREY pp. 223 - 236 1995

[52] **GARCIA BOIVIN. S.**, Retrait au jeune âge du béton : développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène, thèse de doctorat, ENOC, 251 pages, 1999

[53] **ACKER. P & Ulm**, Micromechanical analysis of creep and shrinkage mechanisms, concreep MIT, Boston 2001

[54] **POWERS. T. C.**, The thermodynamics of volume change and creep, Materials and Constructions 1968, 1 (6), p. 487 - 507

[55] **MATTE. V.**, Durabilité des bétons à ultra hautes performances: rôle de la matrice cimentaire, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan & Université de

Sherbrooke

[56] **LASSABATERE. T**, Couplages hydromécaniques en milieu poreux non saturé avec changement de phase. Application au retrait de dessiccation, Thèse de doctorat de l'ENPC, novembre 1994

[57] **WITTMANN. F. H**, Interaction of hardened cement paste and water, Journal of American ceramic Society, 56(8), p. 409 - 415

[58] **OCHITA. H & TANABE. T**, Modeling of water migration phenomenon in concrete as homogeneous material, Journal of Engineering Mechanics 2000, 126 (5), p. 551 - 553

[59] **MANGAT & al**, Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances, Etudes et recherches des LCPC OA 22, 343 pages, 1997

[60] **MIAO. B**, New method to measure the early – age deformation of cement based materials, shrinkage 2000, proceeding of the international RILEM workshop Paris 2000

[61] **L'HERMITE. R**, Volume changed of concrete, Proceedings of 4th International Symposium on the Chemistry of cement, Washington 1960 D.C. p. 659 - 94

[62] **DEL CAMPO. M**, A new method to study volume changes on the neat cement paste, Bulletin RILEM? 4, PP18 6 23, 1959

[63] **VERBECK. G. J & al**, Structures and physical properties of cement paste, 5th International Symposium on Chemistry of Cement, 1968 Cachan, 3, p 1 - 36

[64] **BASOUL. A**, Formation des microfissures, Annales de l'ITBTP, N° 398, série Béton, N° 202 Octobre 1981

[65] **BARCELO. L**, Influence des caractéristiques des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune âge, thèse de doctorat, LMT-ENS de Cachan, Oct. 2001

[66] **BAZANT. F. H & al**, Statical extrapolation of shrinkage data – part I: regression ACI Materials Journal 1987

[67] **KIM. L. K. & LEE. C. S**, Prediction of differential drying shrinkage in concrete, Cement and Concrete Research, 28 (7), p.985 – 994 1998

[68] **ROSSI. P**, Les bétons de fibres métalliques. Presss de l'ENPC. 1998 , 309 p

[69] **AMMOUCHE. A**, Caract2risation automatique de la microfissuration des bétons par

traitement d'images. Application à l'étude des différents faciés de dégradation, thèse de doctorat Université de Bourdeaux 1 – Université de Laval, 180 pages, 1999

[70] **LOUKILIA. A, CHOPIN. D, KHELDJ. A, LETOUZO. J-Y**, A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at early age considering temperature history, Cement and Concrete research, ° 30, pp 915 - 922, 2000

[71] **DEHOUSE. N, SALHOUL**, Considérations relatives au comportement à la fissuration et à la rupture du béton renforcé de fibres, Matériaux et Constructions, 1985, Vol.8, N°104, pp.83 - 92

[72] **BENTUR. A & al**, Cracking and processes in steel fibre reinforced cement and concrete research, 1984, vol. 12

[73] **BONZEL. J, SMCHIDT. M**, Distribution and orientation of steel fibers in concrete and their influence on characteristic of steel fiber concrete, RILEM, Symposium Sheffield, 13 - 17 july 1986

[74] **YUAN. Y, WAN. Z.L**, Prediction of cracking within early-age concrete due to thermal, drying and creep behaviour, Cement and concrete Research, 2002, 32, p. 1053 - 1059

[75] **JOHNSON. C.D**, Steel fiber reinforced and plain concrete factors influencing flexural strength measurement, A.C.I. Materials Journal, 1982, Vol.79, N° 2, 12p

[76] **NEVILLE. A. M**, Properties of Concrete third edition first published, New York, L ONGMAN Scientific and Technical, 1990, 779p

[77] **MANGAT & al**, Long-term of steel fiber reinforced marine concrete, Materials and Structures, 1987, Vol. 20, N° 118, pp.

[78] **A.C.I.**, Committee 544, Measurement of properties of fiber reinforced concrete, A.C.I Materials Journal, 1988, Vol. 4, N° 5, pp. 9- 30

[79] **HEINFLING. G & al**, A comparative study of type models as an illustration of a guide for the engineer, Revue française de Genie Civil 1999, 3 (3-4), p. 219 - 243

[80] **ABSI. E, NAAMAN. A.E**, Modèle rhéologique pour les bétons de fibres, In: FRC 86 – Developments in fibre and concrete, RILEM Symposium, Sheffield, 1986, London, Ed: Sway – wagstaffe – Oakley, 1986, 6p

[81] **JOHNSTON C., ZEMP R**, Flexural Fatigue performance of steel fiber reinforced concrete. Influence of fiber content. Aspect ratio and type, ACI Materials Journal, 1991 , Vol.88, N°4, pp. 374-383.

[82] **HOUARI H., DEBICKI G., CLASTRES P.**, Behaviour of concrete reinforced with metal fiber under cyclic loading, Proceeding of the Second International Symposium, Textile Composites in Building Construction, Lyon, France, June 23-25 1992, Editions Pluralis, 1992, Part 1, pp. 57-67.

[83] **MAJUMADAR Z.**, « Fiber cement and concrete, composition. », (G.B), January 1975.

[84] **EDGINGTON J., HANNANT D.J., WILLIAMS R.I.T.**, Steel fiber reinforced concrete. », G.B. Building 1974.

[85] **EL HACHEM M.**, « Etude de l'influence de la fibre de fonte amorphe sur le retrait et le fluage du béton », Thèse Doct., Ecole Centrale Paris, 1990, 165p.

[86] **HOUARI H.**, Etude de l'influence de la fibre métallique sur le fluage et la fatigue du béton, Séminaire National de Génie Civil, Guelma, Algérie, 24-25 Oct. 1994, 10p.

[87] **ARABI. N, REDEL. B, MELINGE. Y, JAUBERTHIE.R.** International "Alkali resistant glass fibre reinforced cementations materials for patching applications" Proceedings of 1st Concrete Conference one to repair, France 15-17 JULY? 2003.

[88] **BALAGURU P., RAMAKRISHNAN,** Fibre reinforced concrete properties : Workability- Behaviour under long term loading-and Air-Void Characteristics , 1987, Vol.20, N°118, pp.283292.-

[89] **SWAMY. R.N, STRAVRIDES. H,** Some properties of high workability steel fiber concrete . Sheffield 1975.

[90] **MANGAT P.S, AZARI M.M,** A theory for the free shrinkage of steel reinforced cement matrices, Journal of Materials Sciences, 1984, Vol. 19, pp.2183-219

[91] **DUPIN.R, LANCHON.R** Aggregates, grounds, cements and concretes" Editions Casteilla 75005 PARIS 1995, pp 122-136.

[92] **CHEN,** Steel fiber concrete mix, proportioning, Philadelphia, Paper presented at A.C.I. Convention, Mars 2004.

[93] **YSSORCHRE. M. P,** Microfissuration et durabilité des bétons à hautes performances. Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 1995

[94] **VIALIS – TERRISSE. H,** Interaction des Silicium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles, Thèse de doctorat de l'université de Bourgogne 2000, 256

[95] **WITASSE. R**, Contribution à la compréhension du comportement d'une coque d'aéroréfrigérant vieilli : définition d'un état initial, influence des effets différés sous sollicitations hydromécaniques, Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon

[96] **KOVLER. K**, Drying creep of stress induced shrinkage, dans Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of concrete and other Quasi – Brittle Materials, edited par F-J Ulm Z.P Bazant and F.H Witmann, Elsevier, Cambridge, 2001 p, 67 - 72

[97] **KANNA. V & al**, Effect of shrinkage and moisture content on the physical characteristics of blended cement mortars, Cement and Concrete Research, 18 (10) 1998, p, 1467 - 1477

[98] **VAN ZIJL. G**, Computational modelling of masonry creep and shrinkage, PhD thesis, University de Delft, Pays - Bas 1999, 170 p

[99] **RAOOF. S**, Absorption et distribution de l'eau dans les milieux poreux, Thèse de doctorat de l'université de Marne-la-Vallée, Paris 1998, 196 p

[100] **ABDOU K., CHIKH N., HOUARI H.**, «Le béton renforcé de Fibres Métalliques. Principes et Structures. », Séminaire National de Génie Civil, Guelma, Algérie, 24-25 Octobre 1994, 12p.

[101] **HUA. C & al**, Retrait d'autodesiccation du ciment analyse et modélisation macroscopique, Bulletin de liaison des Laboratoires des ponts et chaussées, N° 196 , 1996 pp, 79 - 89

[102] **EDGINGTON J., HANNANT D.J., WILLIAMS R.I.T**, Steel fibre reinforced Concrete, G.B. Building 1985

[103] **ZAYAT K**, Contribution à l'étude du comportement au choc du béton de fibres. Thèse de Doctorat INSA, Lyon I, 1989.

[104] **BING CHEN & JUANYU LIU**, Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 7, July 2004 - 1263

[105] **CORINALDESI. V & MORICONI. G**, Durable fiber reinforced self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 2, February 2004, pages 249-254

[106] **JOHNSTON. CD & al**, Effects of superplasticizers on properties of fresh and hardened concrete. Washington, D.C. Transportation research board, Dec 1979, p. 1-7, n° 720

[107] **ASHBY. M, BRECHET. Y, SALVOL. L**, Sélection des procédés de mise en œuvre.

Traité des matériaux n° 20. Presses polytechnique et universitaire romande. 2001

[108] **CHAFLI. N**, Matrice cimentaire renforcée de fibres. Valorisation des sous produits (polystyrène, copeaux d'acier, copeaux de bois). Thèse de magister. Mars 2005. 140 pages.

[109] **ACI Committee 209**, Prediction of creep, shrinkage and temperature effects of concrete structures, American Concrete Institute (SP-76), 1982, pp 255-301.

[110] **BRARA. A KLEPACZKO. J.R**, Experimental characterization of concrete in dynamic tension, Mechanics of Materials, 38 (3) 2006, pp 253-256.

ANNEXES

*

ANNEXE 1 : Formulation du mortier de fibres

Composition des mortiers de référence

Première composition :

E / C = 0.50

- Ciment..... 18.75 kg
- Sable (0/0.5).....37.5 kg
- Eau.....9.39 kg
- Fluidifiant 1% C.....6.25 kg

Temps d'écoulement
trop liquide

Deuxième composition :

E / C = 0.42

- Ciment.....26.48 kg
- Sable (0/0.5).....53.08 kg
- Eau.....11.12 kg
- Fluidifiant 1%C.....3.9 kg

Temps d'écoulement
trop liquide

Troisième composition :

E / C = 0.34

- Ciment.....26.48 kg
- Sable (0/0.5).....53.08 kg
- Eau.....8.94 kg
- Fluidifiant 1%C.....4.16 kg

Temps d'écoulement
t = 26 s trop sec

Quatrième composition :

E / C = 0.40

- Ciment.....26.48 kg
- Sable (0/0.5)..... 53.08 kg
- Eau.....10.59 kg
- Fluidifiant 1%C.....3.97 kg

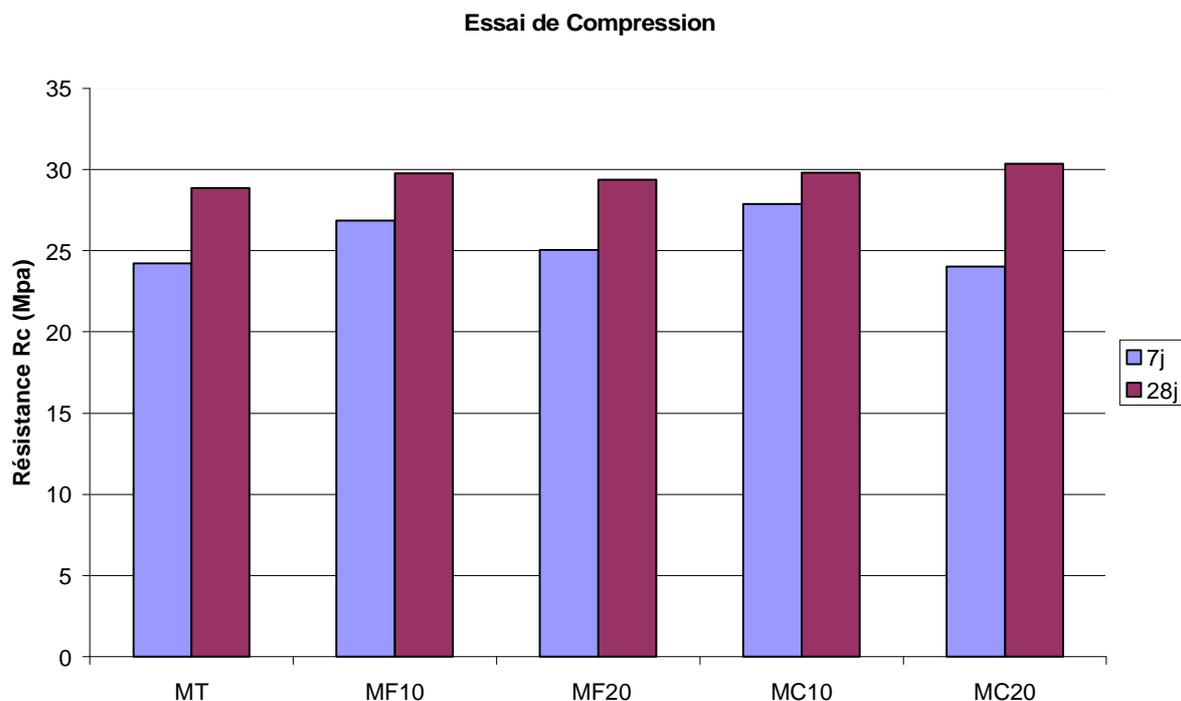
Temps d'écoulement
10 s < t < 15 s

ANNEXE 2 : Essais statiques (MONOTONES)

Annexe 2.1 - Résultats des essais de compression statique : (éprouvette 16 x 32 cm)

- âge de chargement : 7 jours et 28 jours

Résultats des essais de compression (en Mpa) Sur des éprouvettes 16x32 cm en mortier Conservées en mode ambiant (20C°, 55%)					
Age / Mélange	MT	MF10	MF20	MC10	MC20
7j	24.20	24.25	24.35	24.45	24.533
28j	28.15	28.35	28.60	28.81	28.94



Annexe 2.2 - Résultats des essais mécaniques en compression sur des pièces 16x32 (âge de chargement : 7 jours)

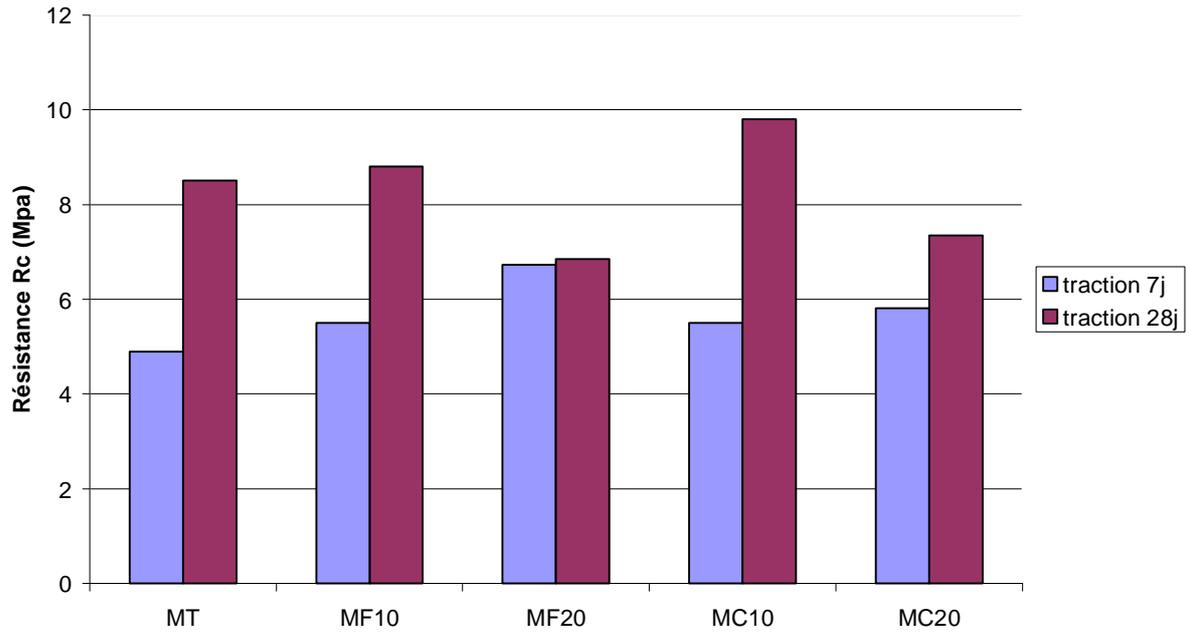
Type de mortier	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} ‰
MT	44.20	33.15
MF10	36.70	37.10
MC10	40.08	31.08

Annexe 2.3 - Résultats des essais de traction par flexion : (épreuve 7 x 7 x 28 cm)

- âge de chargement : 7 jours et 28 jours

Résultats des essais de traction par flexion (en Mpa) Sur des éprouvettes 7x7x28 cm en mortier Conservées en mode ambiant (20C°, 55%)					
Age / Mélange	MT	MF10	MF20	MC10	MC20
7j	4.89	5.50	6.73	5.50	5.81
28j	8.50	8.80	6.85	9.80	7.35

Essai de Traction



ANNEXE 3 : Résume les différentes valeurs de K_{dur} pour les différents mélanges.

Mélanges Résistances	Résistance de traction (vieilliss) R_{dur}	Résistance de traction (saturée) R_{sat}	K_{dur}
MT	7.50	8.50	88.20%
MF 10	6.70	7.35	91.15%
MF 20	8.80	9.80	89.79%
MC10	8.30	9.80	84.69%

MC20	6.10	6.73	90.63%

ANNEXE 4 : Fiche technique du fluidifiant

Caractéristiques

Forme	Liquide
Couleur	Marron
pH	8.2
Densité	1.22
Teneur en chlore	< 1g par litre

Propriétés

		Améliore la fluidité
		Augmente la maniabilité
Sur frais	béton	Réduit l'eau de gâchage
		Facilite la mise en oeuvre

Propriétés

		Augmente les résistances mécaniques
Sur durci	béton	Diminue la porosité
		Augmente la durabilité

Propriétés

Mode d'emploi	Est introduit dans l'eau de gâchage Après que 50à70% de l'eau ait été introduit
Dosage	0.6 à 2.5 % du poids de ciment
	Conditionné en bidon de 12 et 25 kg et fût de 270 kg

ANNEXE 5 : Fiche technique des fibres normalisées.

Provenance	MEDAFAC
Forme	Bâtonnets ondulés
Longueur	50mm
Epaisseur	0.6 + 0.09 mm
Composition chimique	
	0.08 – 0.12 %
Carbone	0.8 – 1%
Manganèse	0.06 %
Silice	0.06 – 0.08%
Phosphore	00
Soufre	
Allongement à la rupture	3 à 4 %

ANNEXE 6 : Fiche technique des fibres recyclées.

Fibres	MC
Provenance	Déchets CMT Oued

	Hmimime
Forme	Ressorts
Longueur	50mm
Epaisseur	0.6mm
Composition	Acier CF 45
chimique	0.43 – 0.49%
Carbone	0.5 – 0.8 %
Manganèse	0.15 – 0.35 %
Silice	0.025 %
Phosphore	0.025 %
Soufre	
Allongement à la rupture	14 %