



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA



FACULTE DES SCIENCES APPLIQUÉES
Département de Génie Civil et Hydraulique

Laboratoire Exploitation et Valorisation
Des Ressources Naturelles en Zones Arides

N° d'ordre :

N° de série :

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Filière : Génie Civil

Option : Constructions Civiles

Présentée par :

AKCHICHE HAMIDA

Thème

***MODELISATION DE FISSURATION EN FLEXION
ET DU RETRAIT DES BETONS DE FIBRES
DE PALMIER DATTIER***

Soutenue Publiquement le : 01/10/2020

Devant le Jury Composé de :

CHACHA Djamel Ahmed	Professeur	Université d'Ouargla	Président
KRIKER Abdelouahad	Professeur	Université d'Ouargla	Rapporteur
TATI Abdelouahab	Professeur	Université de Biskra	Examineur
TAALAH Bachir	M C A	Université de Biskra	Examineur

DEDICACE

Je dédie cette thèse de doctorat aux bougies du chemin de ma vie, que Dieu les guérisses et les protèges

- *Ma fidèle amie HASNI Hadja*
- *Mon frère Med Lamine*

Sans oublier Mes enfants, et Mes nièces sans exception, que ce travail l'inspirent et l'incitent à mieux faire ;

Que ces chères personnes trouvent dans ce travail le fruit de leurs efforts et leurs sacrifices

HAMIDA AKCHICHE

Remerciements

Avant de commencer ce manuscrite, Je remercie tout d'abord le bon dieu qui m'a aidé de terminer ce travail « Alahamdou li ALLAH »

J'adresse mes remerciements les plus respectueux, à monsieur "CHACHA Djamal Ahmed " professeur à l'université de Ouargla, Qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse ; Je remercie aussi monsieur "TATI Abdelouahab " professeur à l'Université de Biskra et monsieur "TAALAH Bachir" M. C. A à l'Université de Biskra qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être mes examinateurs. Leurs idées me seront -sans nul doute- très utiles pour la suite de cette recherche, et bien sûre Ces discussions m'ont permis à la fois d'affiner mes projets de recherche et d'élargir ma connaissance du spectre des outils disponibles pour mener à bien mes futurs travaux de recherche.

*Ensuite, comment ne pas remercier mon rapporteur monsieur **KRIKER Abdelouahed** professeur à l'université de Ouargla, qui m'ont suivi, ou plutôt entrainer, depuis l'ingéniorat en Génie civil comme un premier pas ; jusqu'au ce jour de rédiger cette thèse de doctorat ; C'est un réel bonheur de discuter de points scientifiques avec un grand chercheur qui reste pour moi un **Modèle exceptionnel** à suivre bien sûr au plan humain que scientifique, Je tiens à lui remercier pour m'avoir proposé un sujet fort intéressant et pour la confiance qu'il m'a accordée. Il m'a dirigé tout au long de cette étude et m'a donné les grands axes de recherche. Je le remercie aussi pour sa disponibilité, sa gentillesse et sa sensibilité.*

Vue que Cette étude a été réalisée dans laboratoire Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zones Arides (EVRNZA) de l'université de Ouargla, je tiens à remercier les responsables et les personnels travaillant dans ce laboratoire (EVRNZA), ainsi que toutes les personnes du LTP sud Ouargla.

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements, ainsi que ma grande gratitude et reconnaissance envers tous les enseignants de la faculté des sciences appliquées ; surtout : M^{elle} **AKCHICHE Z.**, M^{me} **BOUZIANE K.**, M^{elle} **MEZIANI N.**, Mr **GBAILIA M.**, Mr **ABANI S.**, Mr **SAGAUI S.**, M^{me} **BELARBI D.**, et M^{me} **ELFERGOUGI M.**,*

Mes vifs remerciements à tous les enseignants qui ont participé dans notre formation du primaire, jusqu'à ce staff universitaire.

*Je remercie tous mes amis(es) et mes étudiants surtout : **TAHRI F** et **RAMEL S**; **BAISSA M** et **BOUROUBA S**; **GOUDJIL S**, **ABADLI A**, et **MAHBOUB H**, **BEN ESSADIK A** et **DAREM O.**, ainsi que mes collègues du département de génie civil et hydraulique à l'université Kasdi Merbah d'Ouargla.*

Un merci tout particulier à mon marie qui m'a apportée beaucoup de réconfort et d'aide tant sur le plan scientifique que moral, à ma mère pour tous ses sacrifices, Mon père pour ses encouragements, mes sœurs et mes frères pour ses orientations.

À la fin je veux dire merci pour ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail de recherche.

*..... **Merci infiniment.....***

المخلص

يدخل هذا العمل البحثي في إطار تبيين المواد المحلية للمناطق الصحراوية. تظهر الدراسات التجريبية التأثير المهم للألياف على السلوك الريولوجي للخرسانة ، وكذلك الحد من التشققات للعناصر المعرضة للانحناء.

يعتبر التنبؤ بالتشوهات الريولوجية للانكماش ذو أهمية كبيرة لدراسة متانة ديمومة الهياكل الخرسانية على المدى الطويل؛ في الواقع ، هذه التشوهات يمكن أن تكون السبب الأساسي للتشققات ، و قد تؤدي إلى انهيار المنشأ- نادرا-.

إن الهدف من هذا العمل هو تطوير نماذج قادرة على التنبؤ بسلوك الهياكل الخرسانية فيما يتعلق بالانكماش و التشقق نتيجة الانحناء، لهذا تم تطوير نموذجين جديدين للتنبؤ بالانكماش ، أحدهما مبني على نموذج YOUNG-CHERN ، والآخر على قانون HOUARI؛ كما تم نمذجة السلوك الميكانيكي للخرسانة المعرضة لقوى الانحناء باستخدام برنامج ANSYS ؛ هذا البرنامج يعتمد أساسا على طريقة العناصر المنتهية.

في إطار العمل التجريبي، تم تقديم نتائج سلوك عينات خرسانية و أخرى معززة بألياف نخيل التمر تحت تأثير القوى الميكانيكية و الريولوجية (الانكماش) و هذا لغرض التحقق من صحة النماذج الرقمية المطورة.

نتائج المحاكاة تم مقارنتها مع النتائج التي تم الحصول عليها خلال الاختبارات التي أجريت سابقا (نتائجنا التجريبية وغيرها المستمدة من المنشورات).

لقد قدم لنا تطبيق هذه النماذج نتائج مقبولة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ، خرسانة الألياف ، التشوهات ، الانكماش ، التشقق ، ظاهرة ريولوجية ، النمذجة ، التحقق من صحة النموذج ، العناصر المنتهية .

RESUME

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de valorisation des matériaux locaux en régions désertiques.

Les études expérimentales montrent l'influence importante des fibres sur le comportement rhéologique des bétons, ainsi que la réduction des ouvertures de la fissuration en flexion.

La prédiction des déformations rhéologiques du retrait est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton. En effet, elles peuvent être à l'origine de la fissuration, et même, parfois de la ruine de l'ouvrage.

L'objectif de ce travail est alors de développer des modèles numériques, capable de prédire le comportement des structures en béton vis-à-vis le retrait et la fissuration en flexion. Pour cela, deux nouveaux modèles sont développés pour la prédiction de retrait, l'un basé sur le modèle de YOUNG- CHERN, et l'autre sur l'expression de HOUARI.

Le comportement mécanique du béton fissuré en flexion est modélisé en utilisant le logiciel ANSYS ; Ce modèle a été incorporé dans un code de calcul aux éléments finis. L'analyse du comportement pour des éprouvettes en béton, et en béton de fibre de palmier dattier soumises à des sollicitations mécaniques et rhéologique (retrait), est alors présentée dans le but de validation des modèles numériques élaborés.

Les résultats de simulation sont comparés aux résultats obtenus lors des essais effectués préalablement (nos résultats et autre de la littérature).

L'application de ces modèles a donné des résultats acceptables.

Mots-clés : béton, béton de fibre, déformations, retrait, fissuration, phénomène rhéologique, Modélisation, validation du modèle, éléments finis

ABSTRACT

This research work is part of the valorization of local materials in desert regions.

Experimental studies show the important influence of fibers on the rheological behavior of concretes, as well as the reduction of flex crack opening.

The prediction of the rheological deformations of the shrinkage is of great importance for the study of the durability and the long-term working ability of concrete structures

Indeed, they can be at the origin of the cracking, and even, more rarely, the ruin of the work.

The objective of this work is then to develop numerical calculation tools, able to predict the behavior of concrete structures with respect to shrinkage and cracking in flexion. For this, two new models are developed for the shrinkage prediction, one based on the YOUNG-CHERN model, and the other on the HOUARI expression.

The mechanical behavior of bending concrete is modeled using ANSYS software; this model has been incorporated into a finite element code. The behavioral analysis for concrete specimens and date palm fiber concrete submitted to mechanical and rheological (shrinkage) stresses is then presented for the purpose of validating the numerical models developed.

The simulation results will be compared with the results obtained during the tests carried out before (our results and other literature).

The application of these models has given us acceptable results.

Keywords: concrete, fiber concrete, deformations, shrinkage, cracking, rheological phenomenon, Modeling, model validation, finite elements,

SOMMAIRE

Résumé en arabe.....	I.
Abstract.....	II.
Résumé.....	III.
Liste des tableaux.....	IV.
Liste des figures.....	V.
Notations utilisées.....	VI.
Introduction.....	1

Partie A : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : Généralités sur les fibres et les bétons de fibre

1-1 : Introduction.....	4
1-2. Définition d'un matériau composite.....	4
1-3. Historique et perspective de l'utilisation des fibres.....	5
1-4. Types des fibres utilisées dans le domaine de construction.....	5
1-5. Les fibres végétales	6
1-5-1. Introduction.....	6
1-5-2. Classification des fibres végétales.....	6
1-5-3.Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales.....	7
1-5-4.Les fibres de palmier dattier	8
1-6. Domaines d'application des fibres.....	9
1-7. Les bétons de fibres.....	10
1-7-1. Rôles des fibres dans le béton.....	12
1-7-2. Mécanisme de rupture des bétons de fibres.....	13
1-7-3. Comportement du béton de fibre en flexion.....	15
1-7-4. Résistance de béton de fibre à la flexion.....	16
1-8.Conclusion	18

CHAPITRE 2 : Généralités sur le retrait et la fissuration des bétons

2-1.Introduction.....	19
2-2. Le retrait.....	19
2-2-1. Définition	19
2-2-2. Types de retrait	20
2-2-3. Facteurs influençant sur le retrait d'un béton de fibre	21
2-2-4. Autre paramètres d'influence	27
2-2. La fissuration.....	30
2-2-1. Définition	30
2-2-2. Caractères généraux des fissures.....	31
2-2-3. Processus de fissuration.....	31
2-2-4. Divers types et causes de fissuration.....	32
2-2-5. Traitements de fissuration.....	35
2-2-6. Fissuration d'un béton de fibre	36
2-4. Conclusion	36

CHAPITRE 3 : Généralités sur la modélisation des retraits et des fissurations

3-1.Introduction.....	38
3-2. Définitions.....	38
3-2-1. Le modèle.....	38
3-2-2. Etapes de construction du modèle.....	39
3-2-3. La modélisation.....	39
3-3. Modélisation du retrait	40
3-3-1. Introduction.....	40
3-3-2. Modélisation du retrait d'un béton classique.....	41
3-3-3. Modèles de prévision de retrait pour béton renforcé de fibres métalliques...	59
3-4. Modélisation de la fissuration.....	65
3-4-1. Introduction.....	65
3-4-2. Modélisation de la fissuration d'un béton.....	65
3-4-3.Modèles Numérique.....	71
3-5.Conclusion.....	80

Partie B : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 4 : Etude de retrait et de fissuration des bétons de fibres de palmier dattier

4-1. Introduction.....	82
4-2. Caractérisation des matériaux	82
4-2-1. Propriétés des granulats.....	82
4-2-2. Propriétés de ciment.....	84
4-2-3. Propriétés d'eau de gâchage.....	85
4-2-3. Propriétés des fibres.....	86
4-3. Composition de béton classique et de fibre.....	87
4-3-1. Composition du béton Classique.....	87
4-3-2. Composition du béton de fibre.....	87
4-4 .Propriétés mécaniques	90
4-4-1. Résistance à la compression	90
4-4-2. Résistance à la flexion du béton classique et de fibre.....	91
4-4-3. Mesure de la flèche et de l'ouverture de fissuration.....	92
4-4-4. Essais d'auscultations dynamiques	97
4-5. Essais sur le retrait	99
4-5-1. Essais sur le retrait de béton.....	99
4-5-2. Exposition des travaux de KRIKER ET MERKHOUI sur le retrait.....	100
4-6. Conclusion.....	105

CHAPITRE 5 : Modélisation de retrait et de fissuration des bétons de fibres de palmier dattier

5-1. Introduction	106
5-2. Définitions et hypothèses	107
5-2-1. Définitions des logiciels de modélisation.....	107
5-2-2. Hypothèses de la modélisation.....	107
5-3. modélisation du retrait	107

5-3-1.. Adaptation de l'expression de HOUARI.....	109
5-3-2. Adaptation de l'expression de HOUARI modifiée sur les résultats de retrait de MERKHOUI.....	109
5-3-3. Application de l'expression de HOUARI modifiée sur les résultats de retrait de KRIKER.....	111
5-3-4. Adaptation du modèle de Young et Chern au retrait du BFPD.....	114
5-3-5.Résultats et Discussions.....	117
5-4. Modélisation de fissuration en flexion.....	118
5-4-1.Création du modèle et Discrétisation en éléments finis par ANSYS.....	119
5-4-2.Analyse des résultats par ANSYS.....	120
5-4-3. Affichages des résultats de modélisation de béton de fibre par ANSYS.....	124
5-6. Conclusion.....	130
Conclusions générales.....	131
Bibliographie	135
Annexe.....	146

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Généralités sur les fibres et les bétons de fibres

Tableau 1-1 : Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres	6
Tableau 1-2 : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.....	8
Tableau 1-3 : Principales propriétés physiques des FSPD (Dokar, Elghers, D-Nour et D-Bida)	9
Tableau 1-4 : Application des fibres dans les produits à base de ciment	9
Tableau 1-5 : Résumé les diverses utilisations des fibres végétales	10
Tableau 1-6 : Résistance à la traction (Rt) et à la flexion (Rf) de quelques BF par rapport au béton classique (BC)	11

Chapitre 2 : Généralités sur le retrait et la fissuration en flexion des bétons

Tableau 2-1 : Les types de fibre utilisés dans l'étude de HOUGGET.....	23
Tableau 2-2 : Les différentes compositions de béton de Barr et all	26
Tableau 2-3 : Caractéristiques des essais de l'influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait du béton	29
Tableau 2.4 : Tableau résumant les différentes causes et périodes d'apparition des fissures.....	33
Tableau 2-5 : Résumé des observations sur les paramètres qui influencent le retrait.....	37

Chapitre 3 : Modélisation des retraits et fluages des bétons

Tableau 3-1 : Les variables des modèles EC2 et B3	48
Tableau 3-2 : Proportions des composants et propriétés mécaniques des bétons utilisés.....	49
Tableau 3-3 : Coefficient de variation d'erreurs (en %) pour le retrait des bétons A1, A2 et A3.....	50
Tableau 3-4 : composition du mortier.....	51
Tableau 3-5 : Les mesures expérimentales de TDC.....	53
Tableau 3-6 : Formulation du béton d'essai.....	56
Tableau 3-7 : Retrait expérimental et réglementaire du B.S.....	57

Chapitre 4 : Etude de retrait et de fissuration des bétons de fibres de palmier dattier

Tableau 4-1 : Propriétés des granulats utilisés.....	83
Tableau 4.2 : Résultats d'analyse chimique pour le sable et le gravier.....	84
Tableau 4-3: Analyses chimiques de ciment.....	85
Tableau 4-4: Propriétés physiques et mécaniques du ciment	85
Tableau 4-5 : Composition chimique de l'eau en mg/l.....	85
Tableau 4-6: Analyse minéralogique de la poudre des fibres de Dokar calcinées à 400 °C	86
Tableau 4-7 : Les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées.....	86
Tableau 4-8 : Les compositions des bétons classiques et du fibre pour un mètre cube.....	88
Tableau 4-9 : La résistance à la compression des différents types du béton.....	90
Tableau 4-10 Résistance à la flexion pour différents types de bétons.....	92
Tableau 4-11 : Résultats d'essai d'auscultation dynamique pour différents types de béton.....	97
Tableau 4-12 : Résultats de retrait	99
Tableau 4-13 : Propriétés des granulats utilisés par KRIKER et MERKHOUFI.....	100
Tableau 4-14 : Composition de béton de fibres de palmier dattier utilisé par MERKHOUFI...	101
Tableau 4-15 : La composition de mortier de fibres de palmier dattier par moule.....	102
Tableau 4-16: Résultats expérimentaux du retrait du mortier de fibre de palmier dattier de MERKHOUFI.....	103
Tableau 4-17: Résultats expérimentaux du retrait du mortier de fibre de palmier dattier de KRIKER.....	104

Chapitre 5 : Modélisation de retrait et de fissuration des bétons de fibres de palmier dattier

Tableau 5-1 : Taux de variation des résultats de retrait	108
Tableau 5-2 : Taux de variation des résultats de retrait de MERKHOUFI.....	110
Tableau 5-3 : Taux de variation des résultats de retrait de KRIKER pour le MF60.....	112
Tableau 5-4 : Taux de variation des résultats de modélisation de retrait de KRIKER pour le MF15.....	113
Tableau 5-5 : Taux de variation de modélisation de retrait du BF par l'expression du YOUNG ET CHERN modifié.....	116
Tableau 5-6 : Taux de variation de modélisation de retrait du BF MERKHOUFI par l'expression du YOUNG ET CHERN modifié.....	117

LISTES DES FIGURES

Chapitre 1 : Généralités sur les fibres et les bétons de fibres

Figure 1-1 : Courbes effort/déformation et examen des ruptures en flexion dans un béton sans fibres et dans un béton avec fibres métalliques.....	12
Figure 1-2 : Schématisation du comportement d'un bloc de béton soumis à une traction directe	14
Figure 1-3 : Rôles des fibres dans le contrôle de la fissuration du béton.....	14
Figure 1-4 : diagramme flèche-effort des BF en flexion quatre points.....	15
Figure 1-5 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du % en masse des fibres.....	16
Figure 1-6 : Influence du % de fibres sur la résistance à la flexion.....	16
Figure 1-7 : Courbes charges – flèches.....	17
Figure 1-8 : Effet d'échelle sur la résistance du béton tendu en flexion.....	18

Chapitre 2 : Généralités sur le retrait et la fissuration en flexion des bétons

Figure 2-1 : Influence de la nature des fibres sur le retrait.....	21
Figure 2-2 : Influence des fibres organiques de la longueur de 06 mm sur le retrait du béton	22
Figure 2-3 Influence des fibres organiques de la longueur de 13 mm sur le retrait du béton	22
Figure 2-4 : Influence des fibres de polypropylène sur le retrait	23
Figure 2-5 : Retrait de béton de fibres métalliques	24
Figure 2-6 : Retrait de mortier de fibres métalliques à 20° et 55% HR	25
Figure 2-6 : Influence de lavage des fibres de palmier sur le retrait.....	26
Figure 2-7 : Retrait des mortiers de fibres à base de ciment CHF conservés dans la cure CU.....	28
Figure 2-8 Retrait de dessiccation des différentes éprouvettes du BAP.....	30
Figure 2.9: Causes de fissuration du béton frais et du béton durci.....	32
Figure 2. 10: Modes de fissures dans une structure en béton armé	34
Figure 2-11 : Comportement du béton à la rupture.....	36

Chapitre 3 : Modélisation des retraits et fluages des bétons

Figure 3-1 : Schéma du principe logique à la base de la recherche des Modèles.....	40
Figure 3-2 : Schéma de l'évolution du modèle vers la loi.....	40
Figure 3-3 : Retrait de béton pour les mesures expérimentales et du modèles ACI et B3.....	51
Figure 3-4 : Séparation de déformation thermique et du retrait.....	54
Figure 3-5 : Estimation de la compatibilité retrait CEB-FIP – retrait Expérimental.....	57

Figure 3-6 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et des modèles ACI.....	64
Figure 3-7 : Courbes contrainte-déformation de quelques fibres végétales	66
Figure 3-8 : Module d'élasticité évalué par ANDONIAN	67
Figure 3-9 : Dispositif de flexion de Banthia et Sheng	67
Figure 3-10 : l'ouverture de fissure en fonction de chargement.....	68
Figure 3-11 : Estimation d'ouverture de fissuration CMOD donnée par Banthia et Sheng.....	70
Figure 3-12 : modèle de MAZARS.....	72
Figure 3-13 : géométrie et maillage de la simulation d'une poutre en flexion quatre points Décentrés.....	73
Figure 3-14. choix d'élément type.....	75
Figure 3-15 : L'Elément SOLID 65.....	76
Figure 3-16. Modélisation du béton de fibres dans ANSYS.....	77
Figure 3-17 Fenêtre d'éditeur des constants réels.....	77
Figure 3-18: Fenêtre de choix de matériau.....	78
Figure 3-19 : Fenêtre d'éditeur les propriétés élastiques du matériau.....	78
Figure 3-20 : les coordonnées des courbes contrainte déformation du béton.....	79
Figure 3-21 : Les coordonnées de modèle.....	79

Chapitre 4: Etude de retrait et de fissuration des bétons de fibres de palmier dattier

Figure 4-1 Coupe transversale d'une éprouvette BF1S.....	89
Figure 4-2 : éprouvette graduée 25mm.....	92
Figure 4-3 positions des comparateurs sur l'éprouvette	93
Figure 4-4 : Fissurations des trois types du béton (BC1 BF1 BF1S).....	94
Figure 4-5 : variation de la Charge- flèche pour différents types du béton	95
Figure 4-6: Module d'élasticité des 3 types des bétons	98
Figure 4-7 : Variation du retrait de béton de fibre pour différents modes de conservation (l=6cm, 0.4%).....	103
Figure 4-8 : Variation du retrait de béton de fibre(l=6cm) pour différents % de fibres(conservation à air libre).....	103
Figure 4-9 : Variation du retrait de béton de fibre pour différents modes de conservation (l=6cm, 0.4%).....	103
Figure 4-10 : Retrait des mortiers de fibres de palmier conservés dans l'étuve CU.....	104
Figure 4-11 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE7-CU	104
Figure 4-12 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE14-CU	104

Chapitre 5 : Modélisation de retrait et de fissuration des bétons de fibres de palmier dattier

Figure 5-1: Modélisation de retrait du béton de fibre BF1 par modèle HOUARI.....	108
Figure 5-2 : résultats de Modélisation de retrait du BF60 de MERKHOUI par l'expression du HOUARI MODIFIE.....	109
Figure 5-3 : résultats de Modélisation de retrait du BF0.4% de MERKHOUI par l'expression du HOUARI MODIFIE.....	110
Figure 5-4 : résultats de Modélisation de retrait du MF60 de KRIKER par l'expression du HOUARI MODIFIE.....	111
Figure 5-5 : résultats de Modélisation de retrait du MF15 de KRIKER par l'expression du HOUARI MODIFIE.....	113
Figure 5-6 : Modélisation de retrait du BF1 par l'expression du YOUNG ET CHERN MODIFIE.....	115
Figure 5-7 : Modélisation de retrait du BF60 de MERKHOUI par l'expression du YOUNG ET CHERN MODIFIE.....	116
Figure 5-8 : création du modèle.....	119
Figure 5-9 : Discrétisation en éléments finis des trois types du béton.....	119
Figure 5-10: Chargement et appuis.....	120
Figure 5-11 : instructions de Solution Controls.....	121
Figure 5-12 : Instructions de la convergence.....	122
Figure 5-13: Newton-Raphson itérative solution (2 load increments).....	122
Figure 5-14: les instructions de solution options.....	123
Figure 5-15: Position déformé de la poutre.....	124
Figure 5-16: Fissuration de la poutre	126
Figure 5-17: Les déformations de la poutre.....	128
Figure 5-18: courbe charge-flèche du BC et BF.....	129
Figure 5-19: Eprouvette pour mesure l'ouverture de fissuration.....	130
Figure 5-20: dispositif de chargement l'ouverture de fissuration.....	131
Figure 5-21: Propagation de fissuration	133
Figure 5-22: Ouverture de fissuration.....	134

Introduction

Le béton dans des conditions naturelles normales est resté le matériau le plus couramment utilisé depuis l'antiquité. Il a l'avantage du coût faible et de sa technique de mise en œuvre assez facile. Ce mélange de produits d'origine naturelle présente en particulier une bonne résistance aux forces de compression, par contre, son comportement à la traction doit être amélioré par l'ajout d'autres éléments de renforcement. Parmi les anciennes solutions appliquées pour le renforcement du béton afin d'améliorer ses propriétés, on rajoutait souvent les fibres. Notez qu'il existe plusieurs types de fibres : métalliques, organiques, végétales.....

En raison de la disponibilité de la fibre de palmier, nous nous sommes intéressés à l'incorporation de ce type des fibres dans le béton afin d'améliorer, non seulement les caractéristiques mécaniques mais pour diminuer l'effet de retrait et de fissuration en flexion.

Puisque notre région (sud-est) d'Algérie est parmi les environs chauds et secs, les conditions climatiques sévères dessèchent les matériaux. Ce qui provoque des retrait très importants par conséquent des fissurations préjudiciables. Pour réduire ce problème une réunion des études sur le renforcement des bétons et des mortiers par les fibres locales de palmier dattier - de la région d'Ouargla - s'impose pour clarifier l'effet positif de l'incorporation de ce type de fibres.

De plus, les structures existantes en béton ont des dimensions variables et importantes, donc il est impossible de réaliser dans des conditions de laboratoire (conditions aux limites maîtrisées), une expérimentation à cette échelle. Il est alors nécessaire, à partir des résultats obtenus sur des éprouvettes de laboratoire, de prédire le comportement de la structure. Cette transition ne peut être effectuée rigoureusement, que si les phénomènes physico-chimiques concernés sont connus et modélisés en conséquence.

Ainsi, la prédiction du comportement différé des structures passe par l'étude des mécanismes des déformations différées et leurs modélisations, afin d'en quantifier, de façon la plus précise, les cinétiques et les amplitudes.

De nombreuses études se sont intéressées au l'introduction et caractérisation des fibres de différentes natures, plus particulièrement la fibre de palmier dattier. Mais, seuls très peu de travaux ont été consacrés à la modélisation des caractéristiques mécaniques et des phénomènes rhéologiques de ce type de béton fibré.

Dans ce contexte, l'objectif principal de ce travail est de développer un modèle de comportement hydromécanique phénomènes de séchage de retrait, et celui qui intègre les

déformations de fissuration en flexion, dans le but d'étudier et de prédire le comportement différé de structures en béton et en béton de fibre. Nous nous limitons dans cette étude à des chargements mécaniques (extérieurs) précis et à des valeurs de température et de l'humidité relative habituellement rencontrées sous nos climats.

La représentation du comportement interne des structures en béton fibré ne peut être abordée que grâce au développement des méthodes numériques. La fissuration est l'une des principales causes de déformation et de dommage dans ces structures. Pour prédire exactement ces comportements, il est préférable d'utiliser les méthodes numériques, basant sur la méthode des éléments finis qui est certainement la mieux adaptée à la discrétisation d'un ensemble de matériaux à comportement très différents.

Une première partie expérimentale de démarrage a été effectuée par les deux chercheurs : MERKHOUI et KRIKER, ainsi cette présente étude consiste la continuité des recherches et la modélisation des résultats.

L'objectif du présent travail est d'une part, d'apporter notre contribution à la valorisation des ressources locales en l'occurrence les fibres végétales de palmier dattier à faible coût, provenant d'une source renouvelable; et de l'intégrer d'une façon rationnelle dans le domaine de la construction, et d'autre part; notre but de recherche est de donner les principales indications permettant d'établir les règles nécessaires pour la modélisation du comportement rhéologique- retrait et fissuration - des bétons et mortier de fibre.

Ce document de recherche portant sur la modélisation de retrait et de fissuration en flexion des bétons et des mortiers renforcés par des fibres végétales de palmier dattier en climat chaud et sec, est structuré en deux grandes parties : une synthèse bibliographique et une étude expérimentale, qui comportent respectivement trois et deux chapitres successifs.

La Première partie : une synthèse bibliographique

Cette partie est composée de trois chapitres.

- Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur les fibres : ses propriétés et applications dans le domaine de construction et dans d'autres domaines, et des généralités sur les bétons de fibre.
- Dans le deuxième chapitre nous donnons des généralités sur le retrait et la fissuration des bétons : définitions, types, paramètres d'influence...

- Dans le troisième chapitre nous citons les recherches effectuées sur la modélisation des retraits et de la fissuration en flexion des bétons, ou nous exposons quelques modèles propres à ces deux phénomènes

La deuxième partie : Étude expérimentale.

Elle est composée de deux chapitres.

- Dans le quatrième chapitre nous exposons les différents résultats expérimentaux relatifs aux essais de retrait et de fissuration en flexion sur les éprouvettes de béton confectionnées conformément aux normes, avec l'analyse et discussions de l'ensemble des résultats obtenus.
- Dans le dernier chapitre nous proposons quelques modèles propres au béton et mortier de fibres de palmier vis-à-vis le retrait et la fissuration en flexion.

Après l'analyse des cinq chapitres, nous finissons notre étude par une conclusion générale explicite du phénomène du retrait et de fissuration en flexion des bétons et mortiers renforcés par les fibres de palmier dattier, notre conclusion est reprendra les principaux résultats de modélisation dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent, les perspectives et recommandations au développement de ce présent travail pour d'éventuels futurs travaux de recherche.

Nous espérons que ce travail apportera une contribution au développement et à l'exploitation des bétons et mortiers de fibres végétales du palmier dattier.

Généralités sur les fibres et les bétons de fibre

1-1. Introduction

Le béton est un composite hétérogène multiphasique, constitué d'un mélange de granulats, sable, ciment et eau, chaque constituant joue un rôle bien défini. La pâte de ciment représente 25 à 40% du volume total du béton.

Par ses nombreuses qualités, le béton se prête à de multiples conceptions. Non seulement il peut être moulé dans des formes les plus diverses, mais il a une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, il est également peu combustible et peu toxique.

Le béton armé : le matériau obtenu en enrobant dans du béton des aciers disposés de manière à équilibrer les efforts auxquels le béton résiste mal par lui-même, c'est-à-dire les efforts de traction, ou renforcer le béton pour résister aux efforts de compression s'il ne peut, à lui seul, remplir ce rôle, il est renforcé parfois par des **fibres** de différentes natures qui donnent des matériaux composites.

Les propriétés mécaniques du béton de fibres dépendent de plusieurs facteurs qui sont : les conditions de mise en œuvre, l'espacement, l'orientation et la distribution des fibres dans le béton.....

On distingue aussi les paramètres liés aux fibres telles que la géométrie, la nature, les caractéristiques mécaniques, le facteur de forme et l'élancement des fibres.

Dans ce qui suit on présente des généralités sur les fibres : types, caractéristiques, utilisations... ainsi que quelques propriétés des bétons de fibres.

1-2. Définition d'un matériau composite

Les matériaux composites sont reconnus comme étant la combinaison de deux ou plusieurs corps de nature et des compositions physiques et chimiques différentes. En d'autres termes, un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues (renfort) réparties dans une phase continue (matrice) de nature différente, Les propriétés des matériaux composites dépendent:

- des propriétés des matériaux constitutifs.
- de distribution géométrique des renforts.
- de l'interaction renfort-matrice.

1-3. Historique et perspective de l'utilisation des fibres

L'idée de l'utilisation des fibres est très ancienne spécialement les fibres végétales. Les fibres ont été utilisées dans la fabrication des cordes et textiles, comme élément de renforcement des matériaux de construction traditionnel, dans la fabrication des briques argileuses.

La naissance de la fibre industrielle, suite aux développements technologiques, a augmenté les champs d'application des fibres dans plusieurs domaines. Les fibres sont utilisées dans le domaine des textiles depuis le XIX^e siècle comme les fibres de coton, et à partir de l'année 1935 la fibre de Nylon (plastique), et récemment la fibre de polypropylène prédomine tous les utilisations [1-4]

Si la fibre d'amiante est considérée comme étant la première fille dans la famille des fibres minérales utilisées dans le renforcement des ciments, la fibre de verre est la première sœur. En effet, le renforcement des ciments par les fibres de verre a commencé à partir des années 50, pour répondre aux exigences et aux nécessités de production des matériaux résistants, durables et légers [5], mais aussi et surtout pour se substituer à l'amiante, originaire de plusieurs maladies sanitaires.

Depuis 1966, les efforts ont été concentrés pour l'amélioration de la qualité de la fibre de verre notamment sa résistance aux alcalis [4]

Parallèlement, la technique d'utilisation des fibres d'acier fût développée. Des recherches se poursuivent pour adapter ces matériaux aux bétons à hautes performances [5-7]

Dernièrement, des recherches sont axées vers l'incorporation des fibres végétales ou naturelles telles que le sisal, le jute et la hampe dans le renforcement des matériaux de construction et particulièrement dans les ciments [8]

1-4. Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction

Le terme " Fibre " se rapporte à un corps solide flexible, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre de quelques millimètres dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Elles sont réparties dans la matrice, soit d'une façon aléatoire ou avec une orientation préférentielle.

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, parmi eux on cite:

- a) les fibres métalliques (acier, fonte);
- b) les fibres organiques (polypropylènes, polyesters, polyamides et polystyrènes);
- c) les fibres minérales (amiante, verre, carbone);

- d) les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier);
- e) les fibres animales (poil, laine, soie)

Le tableau 1-1 ci-dessous donne quelques caractéristiques des différentes fibres utilisées.

Tableau 1-1: Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres [2,9-10]

Fibre	Diamètre en μm	Masse volumique en (g/cm^3)	Module d'élasticité en GPa	Résistance à la traction en GPa	Allongement de rupture en %
Acier	5-500	7,8	200	1-3	3-4
Verre	5-20	2,6	80	1,5-3	2-3,5
Polypropylène	10,200	0,9	5-10	0,4-0,75	15-25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	200	3	2,3
Polyester	-	1,4	8	0,7-0,85	11-13
Carbone	5-9	1,7-2,0	250-400	2-3	0,5-1,5
Cellulose	14-45	1,5	20-40	0,15-0,5	8-12
Jute	18-2000	1,45	-	0,35	3-4
Sisal	10-50	1,5	15,2	0,8	3
Coir	20-700	1,08	2.8	0,17	37.7

1-5. Les fibres végétales:

1-5-1. Introduction

Les fibres végétales sont des matériaux organiques, généralement on les utilise comme isolant thermique et acoustique, et bien sûr comme un renfort cimentaire.

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétale dans la construction remonte à la période où l'on fabriquait des briques renforcées par la paille ou des roseaux. [11] De nos jours (depuis l'année 70), le premier composite liant avec les fibres végétales est le plâtre. Plusieurs ouvrages sont réalisés avec du plâtre renforcé par les fibres végétales [9]

Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs recherches sont orientées vers la substitution de l'amiante par des fibres végétales [4]

1-5-2. Classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes: les fibres de feuilles, de tiges, de bois et de surface.

A. Les fibres de feuilles

Ces fibres sont dures et rigides [4] ; les fibres de feuilles les plus cultivées sont: la fibre de Sisal, d'Henequen et d'Abaca [10]

De ce fait, plusieurs chercheurs tels que : NILSSON [12] et AYYAR et al. [13] ont montré l'efficacité du renforcement du ciment par les fibres de feuilles.

B. Les fibres de tiges

Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de coir, en toute longueur, séparées individuellement par un processus de défilage. Une fois séparées, elles sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et béton [4, 11]

Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie de sun, de kenaf, de urena et de chanvre [4]

C. Les fibres de bois

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs [11-14] ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments.

D. Les fibres de surface

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. On cite par exemple le coton et la noix de coco [8-11]

1-5-3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau [4]. Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, à la rupture et par le module d'élasticité.

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales ont été traitées par plusieurs chercheurs [4,15-18] (Tableau 1-2)

Tableau 1-2: Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales
[4, 6, 8]

Fibre	Diamètre (mm)	Densité (g/cm ³)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Teneur en eau à l'état naturel (%)	Absorption d'eau après 5 min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
Cotton	-	1.5-1.6	587-597	5.5-12.6	-	-	-
Jute	-	1.3	393-773	26.5	-	-	-
Lin	-	1.5	345-1035	27.6	-	-	-
Chanvre	-	--	690	--	-	-	-
Ramie	-	--	400-938	61.4-128	-	-	-
Sisal	0.08-0.30	0.75-1.5	278-577.5	9.4-26.7	10.97-14.44	67-92	92-250
Noix de coco	0.08-0.30	0.67-1.33	72-175	2.0-6.0	11.44-15.85	22-43.2	85-135

1-5-4. Les fibres de palmier dattier :

Parmi les fibres végétales les plus cultivées, on cite les fibres de palmier dattier. D'après des statistiques universitaires [4], dans le sud de l'Algérie, il y'a plus de 800 variétés de palmiers dans les oasis. Les plus connues sont : Deglette Nour, Dokar, Elghers...

On peut avoir plusieurs types de fibre dans le palmier : de bois, de feuille, de tige, de surface...

Le tableau 1-3 résume les propriétés physiques principales des fibres de palmier dattier.

D'après les chercheurs [4,18], les principales caractéristiques des fibres de palmier dattier sont :

- le pouvoir d'absorption assez élevé (123.5% en moyenne),
- les fibres sont poreuses avec une surface alvéolée,
- le pourcentage de cellulose (le responsable de la résistance) est relativement faible par rapport aux fibres de Sisal.

Tableau 1-3 : Principales propriétés physiques des FSPD (Dokar, Elghers, D-Nour et D-Bida)
[4,18]

Propriété	Minimum -Maximum	Moyenne - CV(%)
Diamètre (mm)	0.10-1.00	0.45-54.43
Densité Absolue (kg/m ³)	1300-1450	1383.33-5.52
Densité Apparente (kg/m ³)	512.21-1088.81	900-17.64
Teneur en eau naturelle (%)	9.50-10.00	10-5.00

Avec (CV): Coefficient de variation

1-6. Domaines d'application des fibres

Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration comme les barres d'armature en acier. Les fibres courtes et discontinues ont cependant, l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme [4]

En outre, le renforcement des matériaux à base de ciment par des fibres offre des solutions techniques pour l'amélioration des performances rhéologiques comme le retrait.

Le tableau (1-4) résume les diverses applications des fibres dans les produits cimentaires.

Tableau 1-4: Application des fibres dans les produits à base de ciment [17]

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince, enduit
Acier	Elément de toitures en béton cellulaire, linteaux, revêtements de chaussée, tabliers de pont, produit réfractaire, tuyaux en béton, piste d'atterrissage, réservoirs sous pression, travaux de restaurations.
Polypropylène Nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, éléments flottant de débarquement et amarres pour les marinas, réparation des routes, tuyau sous-marin, travaux de restauration bâtiments.
Amiante	Voiles, tuyaux, panneaux matériaux d'isolation thermique, tuyaux d'égouts, plaques de toiture plates et ondulées, revêtement des murs.
Carbone	Elément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques, planches d'échafaudage.
Particules de mica	Panneaux, tuyaux, travaux de restauration
Végétale	Dalles, tuiles.

Des études ont montré que l'amélioration de la résistance à la fissuration des matériaux comme la terre (fabrication de briques du BTS : béton de terre stabilisée) passe le plus souvent par l'incorporation des fibres. Ces dernières reprennent et répartissent les contraintes exercées dans et sur la terre. Plusieurs sortes de fibres végétales sont utilisées dans ce but (paille, écorce, aiguille de pin) [19]

La paille étant la plus utilisée car elle présente l'avantage d'alléger les produits et donc d'améliorer les qualités d'isolation thermique.

Les fibres végétales peuvent être aussi utilisées dans d'autres domaines pratiques, comme l'indique le tableau 1-5

Tableau 1- 5 : Résume les diverses utilisations des fibres végétales. [4]

Type de fibre	Domaine d'utilisation
<ul style="list-style-type: none"> • Fibres de graine : tel que le coton et le kapok. • Fibres de tige : tel que le lin, le chanvre et le jute. • Fibres de feuille : tel que le sisal et le raphia. 	Textile
Paille, bagasse, Bambou Cotton, Roseau, Sisal, Jute, Chanvre, Abaca, Kenaf et falax	Production du papier
Palmier, Halfa, Cotton...	Art
Fibres végétales/plastique, Fibres végétales/ résine, Ramie/ Polypropylène, Jute/ Polypropylène, Curaua/ Polypropylène	Matériaux composites

1-7. Les bétons de fibres

Le matériau composite « bétons de fibres » (BF) est un matériau relativement nouveau dans le domaine de la construction. C'est vers les années 1900 [20], qu'a eu lieu la première utilisation du béton de fibres d'amiante. Les BF possèdent plusieurs avantages tels qu'une bonne résistance à la fissuration et à la traction, ainsi qu'une bonne ductilité. Par ailleurs, sa résistance à la compression est généralement inférieure à celle du béton classique. Mais, sa résistance à la compression peut être légèrement améliorée par une bonne orientation des fibres dans la matrice. Le tableau 1-6 donne la résistance à la traction (R_t) et à la flexion (R_f) de quelques bétons de fibre.

Tableau 1-6: Résistance à la traction (R_t) et à la flexion (R_f) de quelques BF par rapport au béton classique (BC) [1, 9]

Types de fibres	Volume de fibres en (%)	R_t (BF) / R_t (BC)	R_f (BF) / R_f (BC)
Acier	0.5	2.5- 4.0	-
	1.0	4-5.5	-
	1.5	10.0-25.0	2.0
Verre	1.0	1.7-2.0	2.5-3.5
polypropylène	0.5	1.5-2.0	-
	1.0	2.0-3.5	-
	1.5	3.5-15	-
Nylon	1.0	1.5-1.7	-
Palmier dattier	0.4	0.87-1.06	1.14-1.41

Le comportement de béton de fibre est assez compliqué et difficile à cerner parce qu'il dépend de plusieurs facteurs dépendant eux-mêmes de plusieurs variables telles que :

- les propriétés des fibres qui dépendent de :
 - La nature de fibre (acier, verre, polymère ou végétale) ;
 - L'élanement des fibres ;
 - La quantité d'incorporation des fibres
- Les propriétés de la matrice qui dépendent aussi:
 - De la qualité et la quantité de ciment;
 - De la qualité et les dimensions des granulats;
 - Du rapport E/C.
- Le comportement de la bande d'interface qui dépend:
 - De la longueur des fibres ;
 - De la distribution des fibres, leur orientation et leur espacement ;
 - De type de cure ;
 - Du mode de chargement ;
- Les conditions de la mise en œuvre qui dépendent : Du mode de remplissage du béton (pression, vibration).

1-7-1. Rôles des fibres dans le béton

Généralement les fibres sont destinées à renforcer, ou remplacer l'action des armatures traditionnelles, en s'opposant à la propagation des microfissures.

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme : la résistance à la compression et à la flexion, mais le résultat obtenu était limité.

Il était constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut être précis sous deux volets:

- Transformation du comportement fragile d'un matériau, en un comportement ductile;
- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service ; en réduisant l'ouverture des fissures (figure 1-1).

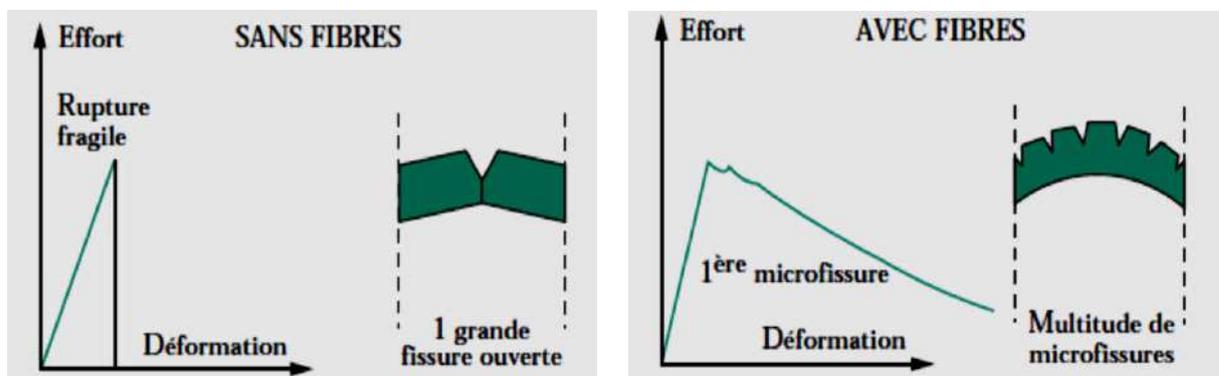


Figure (1-1) : Courbes effort/déformation et examen des ruptures en flexion dans un béton sans fibres et dans un béton avec fibres métalliques [21].

Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent [22-28] :

- l'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire ;
- l'augmentation de la ductilité ;
- la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge;
- la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur);
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion;
- l'amélioration de la tenue au feu, et des résistances : aux chocs, à la fatigue, à l'usure...

Le second rôle principal des fibres est la réduction du taux de retrait; Plusieurs travaux de recherches relatives à l'amélioration des performances rhéologiques du béton montrent que les fibres ont un effet bénéfique sur la réduction du taux de retrait. Ce taux de réduction est influencé par plusieurs paramètres comme: la nature, la quantité des fibres utilisée ... etc. A titre d'exemple, on cite les travaux de:

REHSI [29] qui a montré que l'addition des fibres de noix de coco diminue le retrait de 50% par rapport au retrait du béton sans fibres, sur ce même béton RAMASWAMY et all. [30] confirment la réduction du retrait par rapport au béton classique, mais avec 30% au lieu de 50%.

ZOLLO et all.[31], qui ont utilisé des fibres de polypropylène comme matériau de renforcement du béton, révèlent que l'introduction de ce type de fibres réduit le taux de retrait à 20% pendant les 07 premiers jours.

De même SOROKA [32] a montré que le renforcement par des fibres d'acier, de verre ou de polymère est efficace pour la réduction de retrait, et cela malgré le retrait hydraulique des bétons classiques souvent amplifié par les conditions climatiques chaudes et sèches.

D'autre part, les travaux de ALEKRIS et ALSAYED [33] ont montré qu'au climat chaud et sec de l'Arabie Saoudite, l'introduction des fibres métalliques (dosées à 1% en volume), a permis de réduire le retrait global de 30% après une conservation de 200 jours.

MERKHOUI[3] a montré que la présence des fibres de palmier dattier dans les bétons, avec un dosage massique de 0.3%, a un effet bénéfique pour la réduction de retrait, de même les travaux de KRIKER[4] confirment la réduction du retrait des mortiers à base de fibres de palmier dosé à 1% en volume.

1-7-2. Mécanisme de rupture des bétons de fibres

Le béton est un matériau composite à matrice fragile. L'introduction de fibres a pour objectif le contrôle de la fissuration. Les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement à partir des années 60 grâce aux travaux de ROMUALDI, BATSON et MANDEL [23]. Dans ces travaux, qu'on peut qualifier de fondateurs, on décrit les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure au sein d'une matrice fragile. Ils mettent notamment l'accent sur l'influence de l'espacement moyen des fibres (lié au volume introduit dans le béton) sur le comportement du composite.

ROSSI a proposé une description physique du fonctionnement de ces matériaux [24], d'après lui, il faut considérer deux échelles d'action des fibres: *le matériau* et *la structure*. Soit un

volume de béton de fibres soumis à une traction uni-axiale. On peut distinguer 3 phases sur le courbe effort - déplacement qui décrit son comportement figure 1-2.

Dans la première phase, on observe une microfissuration diffuse, générée à partir des défauts initiaux et de l'hétérogénéité des caractéristiques locales du matériau. A ce stade, les fibres interviennent par couture des microfissures ce qui a pour effet de retarder leur coalescence. La phase 2 correspond à une localisation des microfissures, suivie par la propagation d'une macro-fissure (phase 3) qui sépare le volume en deux blocs.

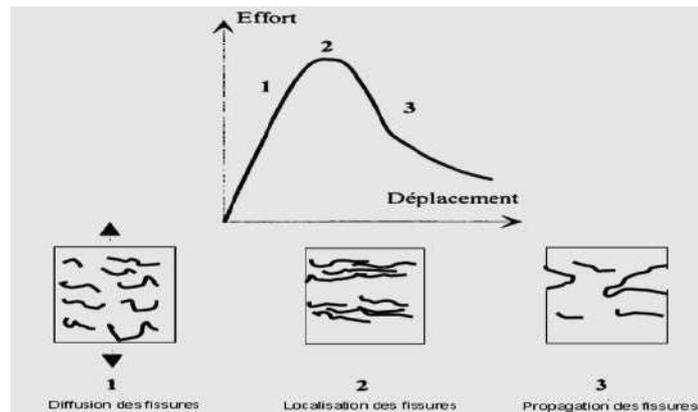


Figure 1-2 : Schématisation du comportement d'un bloc de béton soumis à une traction directe [24].

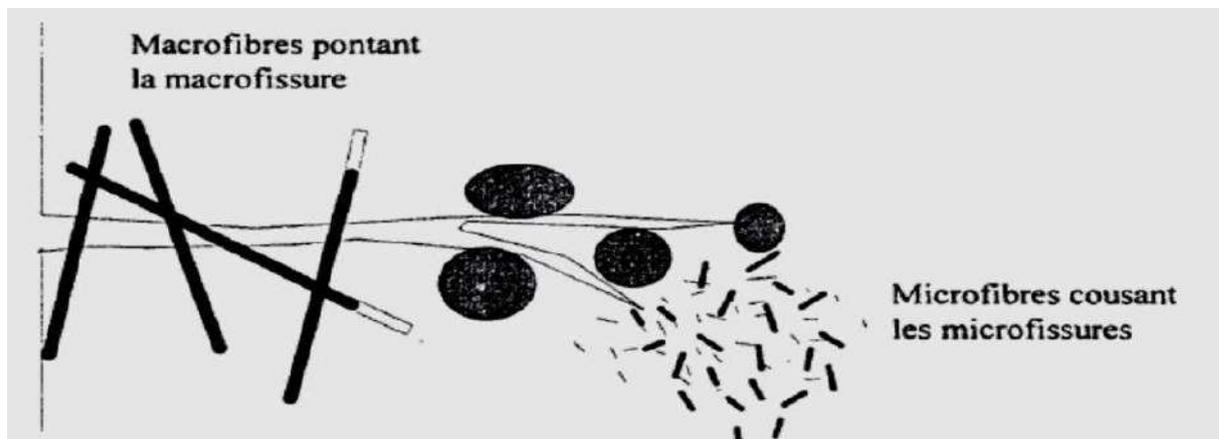


Figure 1-3 : Rôles des fibres dans le contrôle de la fissuration du béton [25].

Seules des fibres fines (pour agir sur les microfissures et assurer leur ancrage) en grande quantité (pour couvrir l'ensemble du volume) peuvent apporter une amélioration des caractéristiques intrinsèques du matériau en retardant le passage à la phase 2. En revanche, en phase 3, le pontage des macrofissures ne peut intervenir que par des fibres longues jouant un rôle similaire aux armatures dans le béton armé, même si le mécanisme d'ancrage est différent. Ce fonctionnement est résumé sur la figure 1-3 [25].

1-7-3. Comportements du béton de fibre en flexion

Les fibres sont très efficaces dans l'amélioration de la résistance à la flexion, et l'énergie de rupture des bétons. Cependant, le comportement en flexion des bétons de fibre est largement influencé par la nature, le pourcentage, et l'orientation des fibres dans la matrice. L'allure générale du diagramme flèche-effort [4], peut être résumée par le diagramme illustré par la figure 1-4.

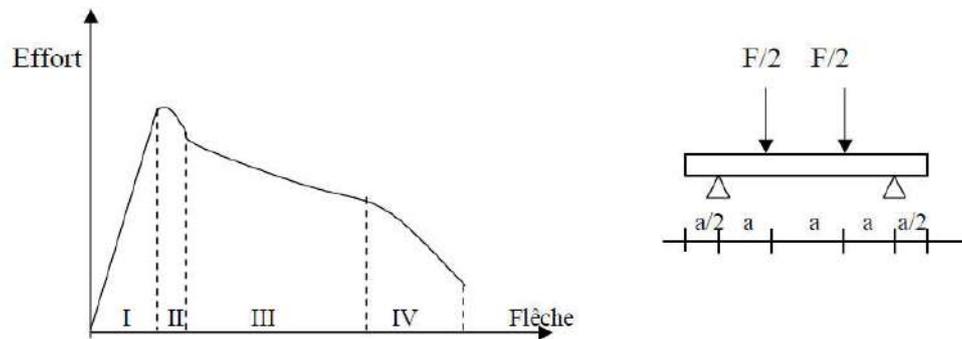


Figure 1-4 : diagramme flèche-effort des BF en flexion quatre points

Le diagramme flèche-effort des BF en flexion comporte quatre zones, à savoir :

- Zone I : Comportement élastique.
- Zone II : Localisation des microfissures qui conduit à l'apparition de la première macro fissure. Cette zone est largement influencée par la qualité de la matrice ainsi que le type et pourcentage des fibres.
- Zone III : Propagation de la macro fissure. Le dosage et l'orientation des fibres sont fondamentaux. Si la contrainte, après la première fissuration, excède la limite élastique de la matrice d'autres macros fissures peut apparaître. La distance entre les fissures dépend de **la longueur** et de **l'orientation des fibres**.
- Zone IV : Ouverture de la principale macro fissure de manière importante et qui correspond à une dégradation du renforcement soit par déchaussement soit par rupture des fibres. Cela dépendra de **l'intensité de l'adhérence matrice-fibre**, qui est fonction du **type**, de **l'état de surface** et de **la longueur des fibres**.

1-7-4. Résistance de béton de fibre à la flexion

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour un béton de fibres car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de changement dans ses applications. On ajoute les fibres dans la matrice pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration.

ABBANI [2], montre que l'augmentation du pourcentage en masse des fibres végétales de palmier dattier de longueur $L=4$ cm, améliore la résistance à la flexion (figure 1-5).

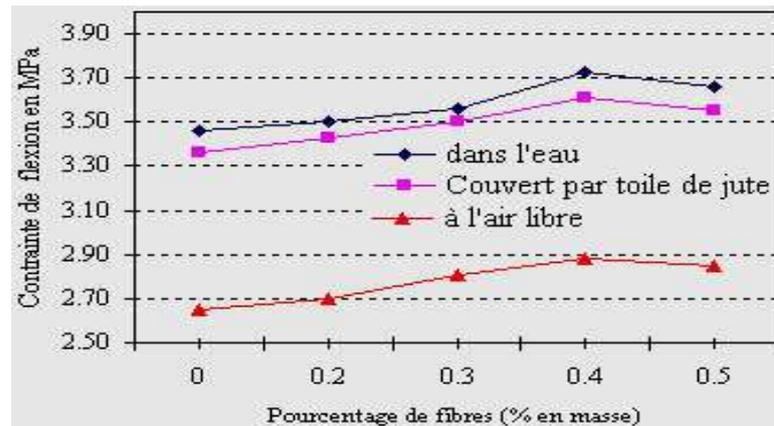


Figure 1-5 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du % en masse des fibres [2].

Dans un rapport publié par A.C.I COMMITTEE 544 [26], les auteurs confirment que les fibres métalliques, introduites jusqu'à 4% par volume, augmentent la résistance de la première fissure deux fois et demi plus de celle de béton non renforcé.

BEN YAHIA [27], a trouvé que l'incorporation de fibres de fil d'attache dans la matrice béton apporte une amélioration de résistance à la flexion pour un volume de fibres n'excède pas 3% (figure 1-6).

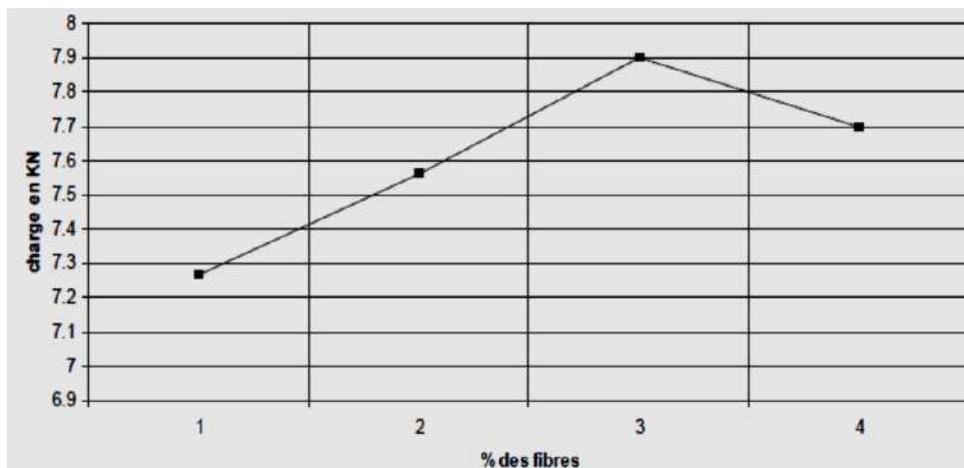


Figure 1-6 : Influence du % de fibres sur la résistance à la flexion [27].

BENTALHA et al [28], ont réalisé des essais de flexion 4 points sur des d'éprouvettes prismatiques de dimensions $10 \times 10 \times 120 \text{ cm}^3$. Les résultats de cette étude ont montré :

- une amélioration des résistances à la flexion à 7 jours.
- une énergie à la rupture supérieure à celle du mortier témoin (sans fibres).
- un comportement très différent à la fissuration entraînant un retard notable à la ruine.

Dont la nomenclature est la suivante :

- BSF : Matrice témoin sans fibres.
- BFI50 : Matrice renforcée avec des fibres commercialisées en acier (FI50).
- BSP50 : Matrice renforcée avec des copeaux d'acier (SP50).
- BSP25 : Matrice renforcée avec des copeaux d'acier (SP25).

La figure 1-7 illustre les courbes charges – flèches de ses différents mélanges.

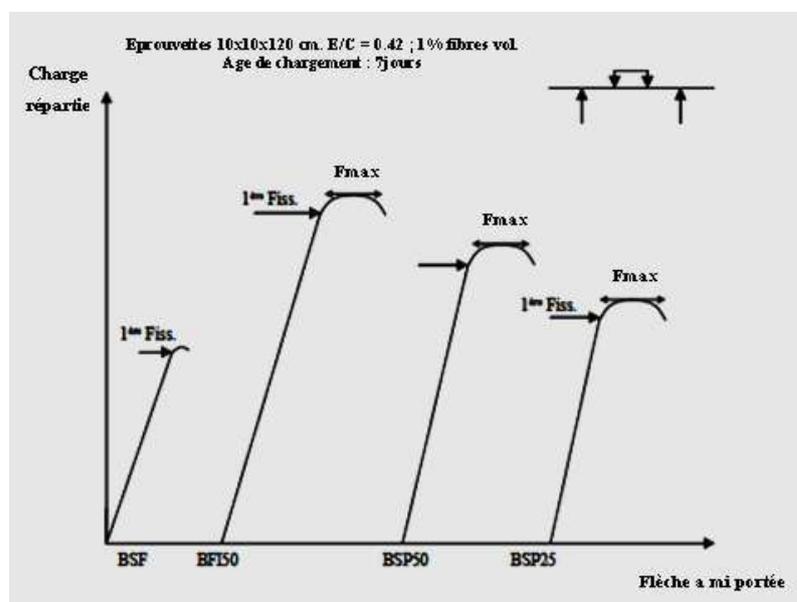


Figure 1-7 : Courbes charges – flèches [28].

D'après MANI [1], afin de comparer entre les deux résistances (traction et flexion), LEFEVRE et L' HERMITE en effectuant des essais de traction, et de flexion trois points sur des éprouvettes normalisées $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$, avaient constaté une augmentation apparente de la résistance du béton tendu en flexion par rapport à sa résistance en traction directe. Cette augmentation semble être liée -suivant ces deux chercheurs - au gradient de la déformation qui est nul en traction direct, et maximal en flexion simple. Dans le cas de la flexion l'effet d'échelle devient important.

D'après MANI [1], Les essais de flexion trois points effectués par l'HERMITE, sur des éprouvettes de différentes dimensions, montrent que la résistance diminue notablement lorsque la dimension augmente.

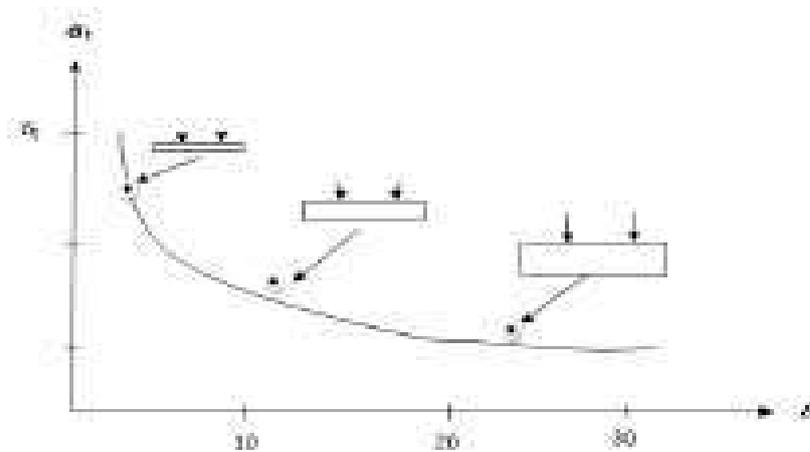


Figure 1-8 : Effet d'échelle sur la résistance du béton tendu en flexion [1]

1-8. Conclusion

Dans ce chapitre un aperçu général a été donné sur les fibres et les bétons renforcés par les fibres. Ainsi que quelques caractéristiques physiques et mécaniques de différents types de fibres, et spécialement les fibres végétales, et leurs d'utilisations dans les divers domaines.

L'idée d'utilisation des fibres est très ancienne, de la simple utilisation (domaine de textile) jusqu'aux diversités actuelles (matériaux de construction)

Actuellement, les types de fibres les plus utilisés dans le renforcement des bétons sont les fibres d'acier. Mais vu le problème de santé que présentent les fibres d'amiante et le problème économique que présente la production des fibres d'acier, de verre ou de polymère, particulièrement pour les pays en voie de développement qui possèdent une grande richesse en fibres naturelles, l'avenir en matière de renforcement sera attribué aux fibres naturelles, ou bien à la limite aux fibres composites (polymère végétal). Pour cela, il est temps d'orienter les axes de recherche vers la valorisation des fibres naturelles dans la construction d'une façon générale et dans le béton d'une façon particulière.

Vu les caractéristiques physico-chimiques ainsi que les caractéristiques mécaniques assez favorables des fibres végétales de palmier dattier, on conclue que le renforcement des matériaux à base du ciment par ce type des fibres, peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration de leurs propriétés mécaniques et rhéologiques.

Généralités sur le retrait et la fissuration en flexion des bétons

2-1.Introduction

Le béton est composé de granulats, de ciment, de sable et d'eau, Ces deux derniers réagissent pour former un composé hydraté qui, en se solidifiant, liaisonnent les granulats. La quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment représente environ 25% du poids de ce dernier.

Dans les zones arides, ou la température est élevée, un grand nombre de constructions subissent des déformations défavorables dans les structures, tels que le retrait et par la suite apparition des fissures [34,35].

Quels sont les définitions et les types de ces phénomènes ?, et Quels sont les paramètres influençant sur le retrait et la fissuration? Dans ce qui suit, nous allons répondre en détail à ses différentes questions.

2-2. Le retrait

2-2-1. Définition

À première vue, le retrait est un phénomène simple qui correspond à une contraction volumétrique que l'on observe quand le béton se dessèche. Il se développe dans les trois dimensions mais, en général, on ne l'exprime que sous la forme d'une déformation linéaire. En effet, dans la majorité des cas, les éléments structuraux ont une ou deux dimensions nettement plus petites que la troisième, où les effets du retrait sont les plus sensibles.

Dans le vocabulaire technique courant, le terme retrait est utilisé à la place de l'expression « retrait de séchage du béton durci exposé à l'air dont le degré hygrométrique est inférieur à 100 % » [34-36]. Il existe cependant d'autres types de retrait qui, selon les circonstances, peuvent, ou non, se produire de façon simultanée et indépendante les uns des autres.

Lorsque l'on observe une pièce en béton et même son gâchage, on constate qu'en absence de toute force extérieure, elle change de volume. Cette propriété, a pris le nom de retrait. Il est, en réalité, la résultante de mouvements complexes dont il est intéressant d'analyser, il est important aussi de préciser qu'il existe plusieurs types de retrait qui seront détaillés par la suite [34]

Afin de permettre la mise en œuvre du béton, le volume d'eau de gâchage atteint couramment 40 à 70% du poids de ciment; Le départ de ce volume d'eau excédentaire constitue l'origine principale du retrait des bétons et mortiers.

2-2-2. Types de retrait

On peut identifier cinq formes de retrait [34-42] :

La première forme, la plus connue, est *le retrait de séchage* qui se développe dans le béton durci ; Cependant, chronologiquement, le retrait de séchage est précédé par le deuxième type: *le retrait plastique*, qui se développe dans des bétons qui perdent de l'eau, alors qu'ils sont encore à l'état plastique. En général, cette perte d'eau se fait par évaporation dans l'air sec ambiant, mais elle peut être aussi la conséquence d'une absorption par un béton ou un sol sec.

Un troisième type de retrait, est celui qui se produit dans du béton, qui durcit par suite du développement de la réaction d'hydratation. Étant donné que ce retrait a lieu dans toute la masse du béton, et pas seulement dans la partie du béton en contact avec le milieu ambiant, on l'appelle parfois *retrait d'auto-dessiccation* et quelquefois aussi *retrait chimique*. On emploie aussi l'expression *retrait endogène*

Le quatrième type de retrait, que l'on peut observer dans un béton, est une conséquence de la diminution de la température du béton au moment de sa prise, ou juste après, quand les dimensions globales de l'élément ont été fixées. Il vaudrait mieux parler dans ce cas de contraction thermique ou *retrait thermique*.

En outre, la réaction de la pâte de ciment hydraté avec le gaz carbonique de l'air CO_2 en présence d'humidité, cause une contraction que l'on appelle le retrait de carbonatation.

Quand ces formes de retrait se développent dans un béton simultanément ou séquentiellement, on parle alors de *retrait total*.

Il est nécessaire de bien comprendre le phénomène d'hydratation, et ses conséquences physiques, mécaniques et thermodynamiques pour prendre toutes les mesures appropriées, afin de réduire et de modéliser les différents types de retrait.

2-2-3. Facteurs influençant sur le retrait d'un béton de fibre:

Comme il a été mentionné précédemment, plusieurs facteurs interviennent dans le retrait du béton classique et celui renforcé par des fibres.

Parmi ces facteurs on peut citer : le mode de conservation, la composition du béton, la nature, la longueur, la quantité ou le dosage, et le blanchissement (lavage) des fibres.

2-2-3-1. Influence de la nature et la longueur des fibres

Après une série d'essais sur des mortiers renforcés par les fibres métalliques (**FD**: Fibres d'acier dramix, et **FF** : fibre d'acier amorphe) de longueur fixe de 30mm; HOUARI [36] a montré la variation de retrait suivant la nature des fibres utilisées, les résultats d'essai sont présentés dans la figure (2-1) ci-dessous.

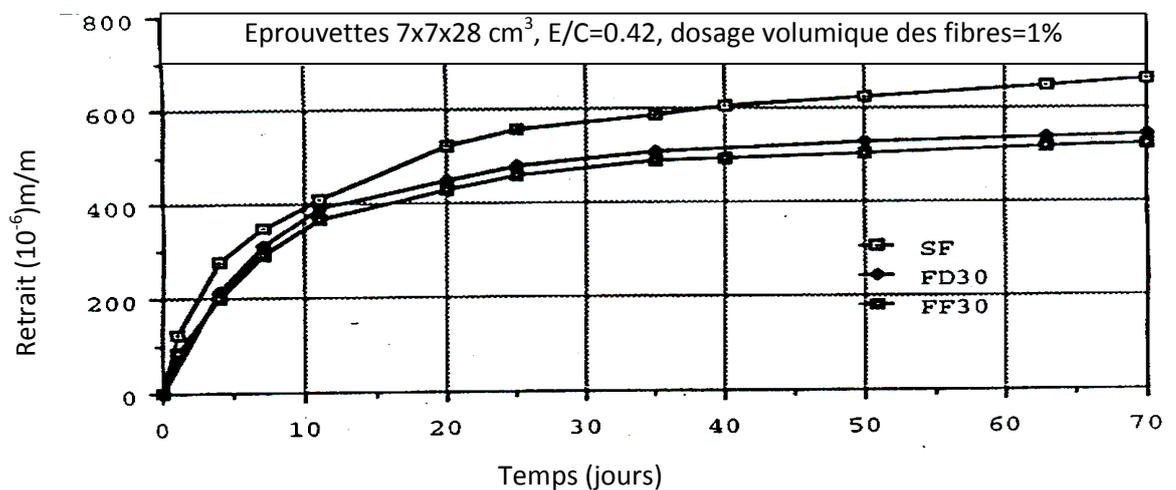


Figure 2-1 : Influence de la nature des fibres sur le retrait [36]

D'autre part, les essais de HOUGET VERONIQUE [37] sur les fibres organiques, montrent l'influence de la nature et la longueur des fibres sur le retrait .figures 2-2 et 2-3.

Le tableau 2-1 résume les différents types de fibres utilisées et la dénomination correspondante

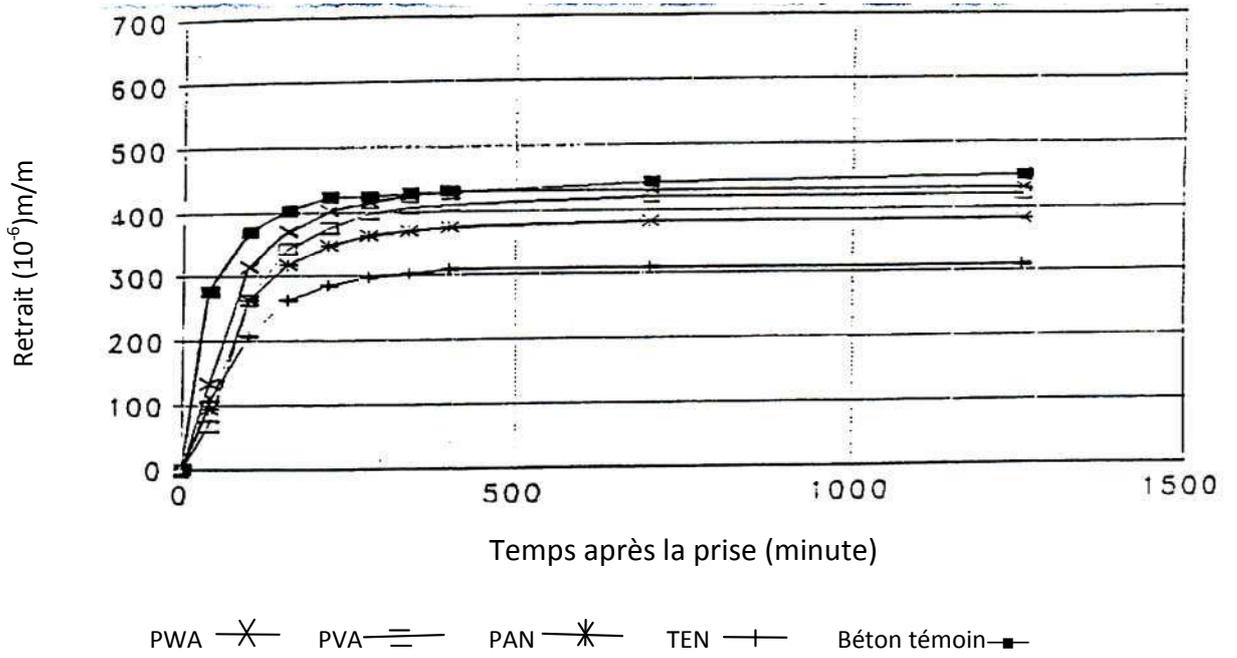


Figure 2-2 : Influence des fibres organiques de la longueur de 06 mm sur le retrait du béton [37]

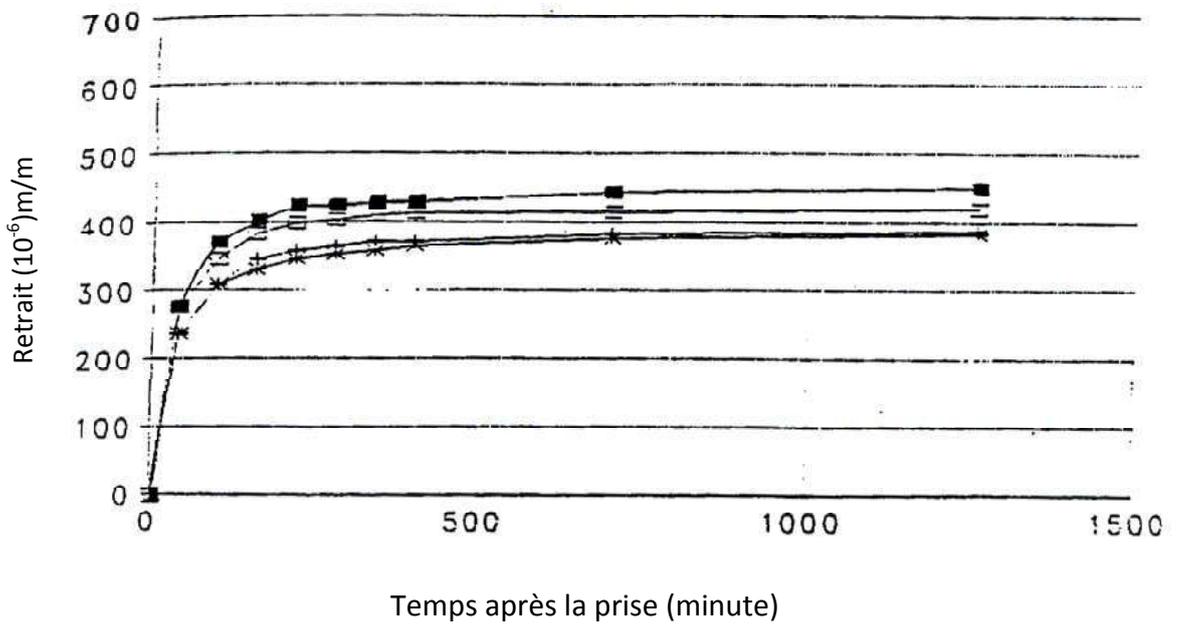


Figure 2-3 Influence des fibres organiques de la longueur de 13 mm sur le retrait du béton [37]

Tableau 2-1 : Les types de fibre utilisés dans l'étude de HOUGGET[37]

Fibre	Longueur de fibre (mm)
<i>Béton témoin (BT)</i>	-
<i>Poly-Amide (PA)</i>	06-13
<i>Poly-acrylonitril (PAN)</i>	06-13
<i>Poly-Vinylakol (PVA)</i>	06-13
<i>Poly-Aramide (PWA)</i>	06
<i>Charbon (TEN)</i>	06

A partir de ces résultats, HOUGGET [37] déduit que l'effet de la longueur est limité seulement aux premières secondes d'essai, et non pas sur le retrait final.

De même, une étude entamée par RAMASWASWAMY et all. [30] a montré qu'après 60 jours de conservation à l'air libre, les bétons de jute et de noix de coco (avec un dosage volumique égal à 01%) présentent un retrait inférieur de l'ordre de 50 et 70% respectivement par rapport au béton classique; les éprouvettes sont conservées durant les premiers 21 jours dans une cure humide avant leurs exposés à l'air libre.

2-2-3-2. Influence de la quantité des fibres

Les résultats d'essai de HOUGGET [37] sur les fibres de polypropylène de longueur de 19mm avec des quantités variantes (500, 900, 1500, et 2000 g/m³) sont illustrés dans la figure 2-4, HOUGGET [37] montre que le choix convenable de la quantité des fibres joue un rôle très important sur la diminution de retrait des bétons de fibre.

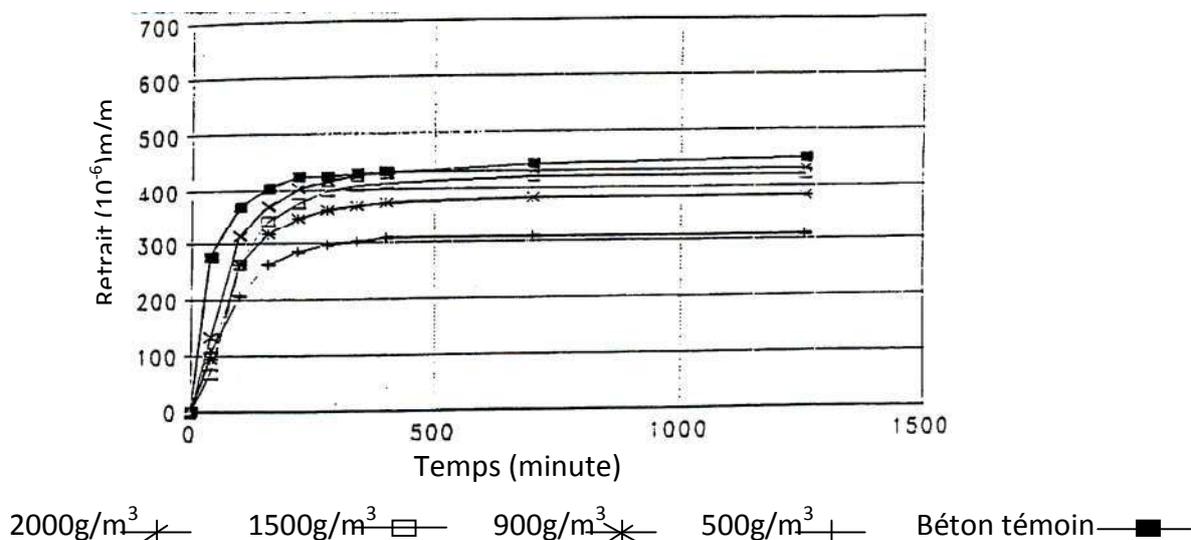


Figure 2-4 : Influence des fibres de polypropylène sur le retrait [37]

Les chercheurs BYOUNGGEON et JASON [38] ont travaillé sur le retrait de pâte de ciment renforcé par les fibres métalliques de longueur 13mm avec des différents dosages volumiques tels que (0%, 0.3%, 0.5%, et 1%).

Ils ont conclu que lorsque le volume des fibres augmente le retrait diminue, comme l'indique la figure 2-5.

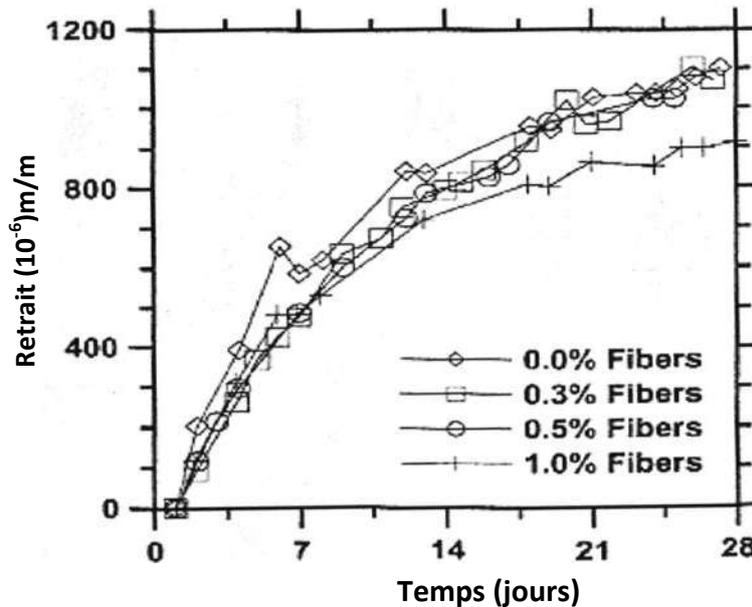


Figure 2-5 : Retrait de béton de fibres métalliques [38]

ABDOU K et al [39] ont montrés que les fibres diminuent le retrait -figure 2-6-, cette diminution est de l'ordre de 16 à 20 % par rapport au mortier sans fibres, ainsi, ils ont remarqué qu'il ya une légère différence (de l'ordre 9%) entre les deux types de fibres.

La dénomination utilisée par ABDOU K et al [39] est

MT : Mortier témoin ;

MF10 : Mortier renforcé de 1 % de fibres métallique industrielles;

MF20 : Mortier renforcé de 2 % de fibres métallique industrielles;

MC10 : Mortier renforcé de 1 % copeaux d'acier;

MC20 : Mortier renforcé de 2 % copeaux d'acier.

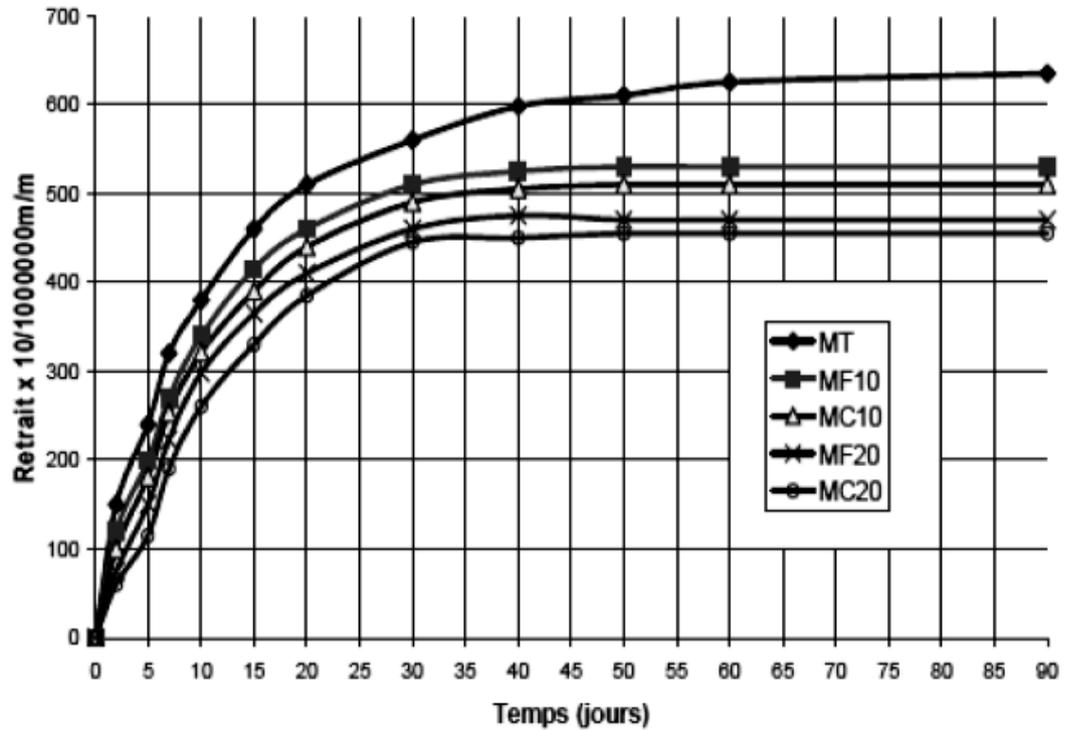


Figure 2-6 : Retrait de mortier de fibres métalliques à 20° et 55% HR [39]

2-2-3-3. Influence de mode de conservation.

Les travaux de BARR et all. [40], ont montrés la diminution du retrait de béton renforcé par des fibres métalliques par rapport au béton témoin pour tous les modes de conservation :

- Dans une chambre contrôlée (HR=60 ± 5%, T=23 ± 2°C)
- À l'air libre (HR=77 ± 8%, T=23 ± 7°C)
- Sur terrasse du bâtiment (HR=71 ± 8%, T=25 ± 7°C)

Ils ont ajoutés que les bétons conservés dans la chambre contrôlée ont présenté un retrait supérieur à celui des bétons de fibres conservées dans les autres cures.

Nous pensons que le seul facteur de variation pour cette étude est l'humidité **car** la température est sensiblement proche pour les trois types de cure.

2-2-3-4. Influence de la composition de béton

Pour mettre en évidence l'effet de la composition du béton sur le retrait, une étude a été entamé par BARR et all. [40] sur les fibres métalliques a montré l'efficacité du choix rationnel et le contrôle strict de la composition pour avoir un retrait minimal.

Les différentes compositions sont détaillées sur le tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Les différentes compositions de béton de Barr et all. [40]

Ref. N° de composition	Dosage massique des composants (*)	Rapport E/C	Dosage en ciment	Résistance à la compression $f_c(N/mm^2)$
01	1 : - : 2.00 : 2.5	0.65	380	30.5
02	1 : - : 1.81 : 2.81	0.60	380	35.0
03	1 : 0.11 : 2.12 : 3.50	0.65	320	45.8
04	1 : 0.11 : 1.77 : 2.97	0.50	380	61.2
05	1 : 0.11 : 1.28 : 2.13	0.35	500	73.0

(*) Les composants indiquées sont respectivement : ciment : fumée de silicate : sable : gravier

Les chercheurs BARR et all. [40] ont montrés qu'avec la composition N°03 l'ajout des fibres métalliques fait diminuer le retrait par rapport au retrait du béton sans fibre avec la même composition, alors que le béton de fibre avec la composition N°01 a un retrait supérieur à celui du béton sans fibre. Cela est dû à l'absence de fumée de silicate et à l'augmentation du rapport E/C

Dans le même axe, [7] rapporte que LOUKILI a ajouté que le béton est influencé par le facteur E/L (eau/liant), il met en évidence l'augmentation du retrait avec l'augmentation du E/L, et comme résultat il a trouvé que pour :

- E/L = 0.09; $\epsilon_u = 250 \mu m/m$
- E/L = 0.15; $\epsilon_u = 350 \mu m/m$
- le retrait total (ϵ_u) est de $550 \mu m/m$ pour E/L = 0.17 ÷ 0.20

2-2-3-5. Influence de blanchissement des fibres

Les études faites par MERKHOUI [3] ont montré l'effet de blanchissement des fibres de palmier dattier avec l'eau de javel d'une faible concentration sur le retrait libre : figure2-6

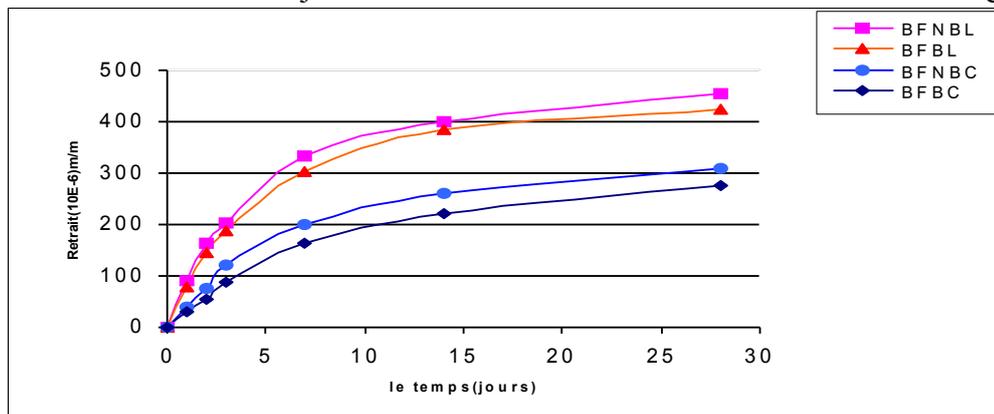


Figure2-6 : Influence de lavage des fibres de palmier sur le retrait [3]

La dénomination utilisée est la suivante :

BFNBL : Béton de fibres non blanchies et conservées à l'air libre.

BFBL : Béton de fibres avec le blanchissement et la conservation à l'air libre.

BFBC : Béton de fibre avec le blanchissement et la conservation dans des ambiants humides.

BFNBC: Béton de fibres non blanchies et conservé dans des ambiants humides.

Il a remarqué que le blanchissement diminue le retrait, quelque soit le mode de conservation, MERKHOUI [3] justifie ce phénomène par le fait que le lavage augmente la cohésion entre les fibres et la matrice; et diminue les pores dans les fibres ce qui réduit l'évaporation de l'eau.

2-2-4. Autres paramètres d'influence:

Outre la complexité du phénomène de retrait et les paramètres cités ci-dessus, s'ajoutent une infinité de variations qui peuvent avoir lieu selon leur combinaison (simultanément ou successivement) [41,42], telles que :

A- Le dosage du ciment : les dosages élevés augmentent la valeur de retrait des bétons et mortiers, c'est ainsi que le retrait d'une pâte pure sera bien supérieur à celui d'un béton. Or; les dosages élevés du ciment n'augmentent pas la résistance d'un mortier ou d'un béton à ces premières heures de prise; Le surdosage aura donc pour effet d'augmenter l'importance de la fissuration [41,42]

B- La propreté des sables : leur retrait évolue dans le même sens que la proportion des argiles et des matières humique (colloïdes) contenus dans les agrégats [41,42].

C- Le rapport E/C le retrait après prise augmente avec la quantité d'eau de gâchage [41,42]

D- La forme et la dimension des agrégats. Le béton tire une bonne partie de sa résistance selon les granulats qui le compose. Il est donc logique de composer un béton à partir d'élément de bonne qualité et de dimension important afin d'obtenir une résistance optimale [41,42].

En outre, la pâte de ciment intervient comme une colle qui assure la liaison entre les différents grains, de ce fait la quantité du ciment nécessaire pour assurer leur bon enrobage évolue directement avec la surface des grains mis en œuvre par unité de volume

Le dosage en ciment devra donc être d'autant plus élevé que les grains seront plus fins ; à titre d'exemple un granulat 30/60 a une surface spécifique d'environ $5 \text{ dm}^2/\text{Kg}$; alors que celle d'un sable fin peut atteindre facilement $30 \text{ dm}^2/\text{Kg}$

Or, le retrait du béton augmente avec son dosage en ciment. On a donc intérêt à utiliser des agrégats de grandes dimensions.

E. Nature du ciment

Les ciments de faible classe de résistance mécanique ont des retraits plus faibles que les autres; les ajouts n'ont pratiquement pas l'effet sur ce phénomène, KRIKER [4] a trouvé que le changement des ciments a un effet sur les retraits des mortiers des fibres de palmiers dattiers, il a remplacé le ciment CPA CEMI 52-5 par un ciment CHF-CEM III 32-5. Les résultats des essais sont illustrés dans la figure 2-7

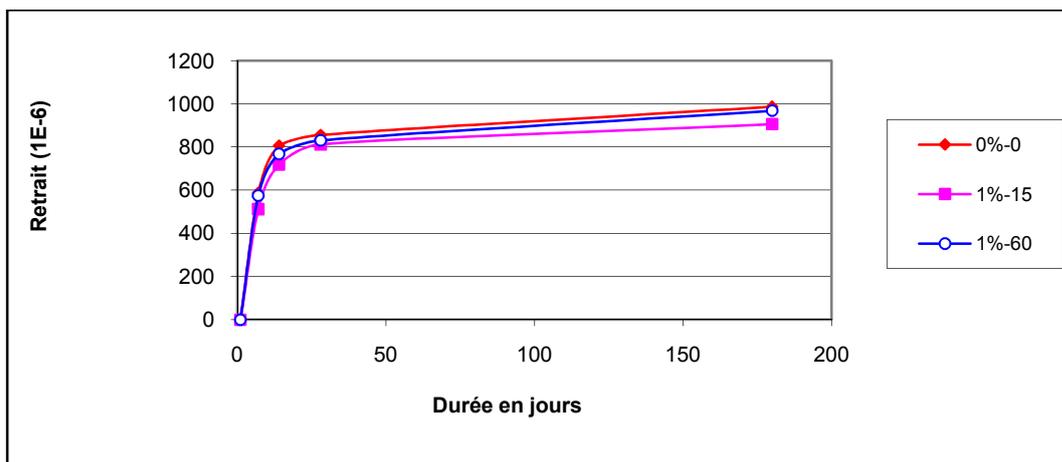


Figure 2-7: Retrait des mortiers de fibres à base de ciment CHF conservés dans la cure CU [4]

Il a constaté que les mortiers de fibre à base de CHF et conservés dans l'étuve ont présenté des retraits supérieurs à ceux des mortiers à base de CPA.

Le chercheur KRIKER[4] a justifié ce phénomène par le fait que la cinétique d'hydratation des mortiers à base de CHF est plus faible par rapport à ceux à base de CPA, ce qui augmente la quantité d'eau libre dans la matrice des mortiers CHF et par conséquent leur retrait.

F. Les dimensions de l'éprouvette

Le tableau 2-3 donne les conditions et les résultats de quelques essais relatifs à l'influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait effectué par différents auteurs [34], le rayon moyen étant le rapport de la section transversale à son périmètre.

Tableau 2-3 : Caractéristiques des essais de l'influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait du béton [34]

Auteur	Éprouvette		Conditions d'essais	Retrait (μ/m)
	Dimension en cm	Rayon moyen en cm		
DELARQUE	12X12X100	3.00	Conservation à environ 50% d'humidité relative	Après 200 j
	15X15X100	3.75		227
	17X17X100	4.25		219
KARAPETIAN	Ø14X60	3.50	démoulage après 3j conservation un mois dans la sciure humide ensuite à 50% d'humidité relative et 21°C	Après 300 j
	25X60	6.25		650
WELL	Ø10 X 40	2.50	démoulage après 24h conservation 7j sous des tissus humides ensuite à 65% d'humidité relative et 20°C	Après 300 j
	20 X 80	5.00		300
	30 X 120	7.50		250
	40 X 180	15.00		185
				150

Pour les éprouvettes de petite dimension, le retrait se développe rapidement et atteint sa valeur maximale. KEDJOUR [34] a justifié ces résultats par la diminution du rayon moyen avec la diminution des dimensions, ce qui facilite le départ de l'eau et par conséquent l'accélération du retrait.

Selon [22] et dans le but de mettre en évidence l'influence de la forme et les dimensions des éprouvettes sur le retrait de dessiccation; Les résultats d'essai de Loukili sur trois éprouvettes de tailles différentes: Ø7x28, Ø11x22, Ø16x32 d'un béton auto-plaçant (BAP); sont illustrés dans la figure 2-8; D'après cette figure, Loukili montre aussi que le retrait de dessiccation à un instant donné est fonction décroissante du rayon moyen de séchage.

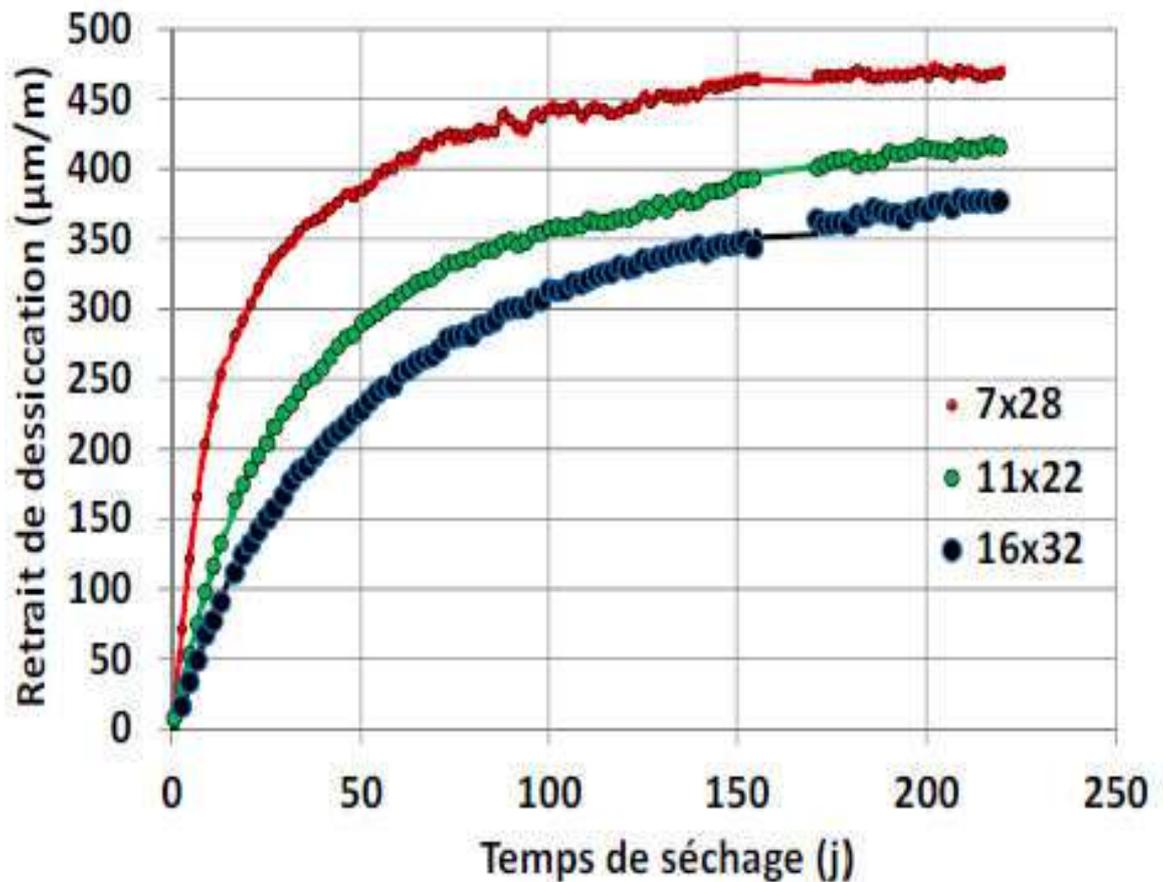


Figure 2-8 Retrait de dessiccation des différentes éprouvettes du BAP [22]

2-3. La fissuration

2-3-1. Définition

La fissure est un défaut ou une discontinuité brutale apparue dans un matériau sous l'effet de contraintes internes ou externes, où la matière est séparée sur une certaine surface. Les fissures sont un facteur limitant essentiel de la résistance mécanique des matériaux.

Plusieurs études ont montré qu'il existe- même avant l'application de toute charge- des très petites fissures, à l'interface pâte de ciment-granulat, ces fissures sont probablement attribuables aux différences inévitables entre les propriétés mécaniques existant entre les gros granulats et la pâte de ciment hydraté, couplées au retrait ou aux déformations d'origine thermique. Les fissures présentes dans le béton avant le chargement sont en grande partie responsables de la faible résistance à la traction du béton [42-46]:.

Il est important de préciser qu'il existe plusieurs types de fissuration qui seront détaillées par la suite.

2-3-2. Caractères généraux des fissures

Parmi les caractères généraux des fissures on peut citer les suivants [47-50]:

- Toute fissure constitue le signe d'une première manifestation de désordres possibles, c'est ce qui explique, dans une certaine mesure, les préoccupations des constructeurs.
- Les fissures ne sont pas dangereuses si elles ne compromettent pas la stabilité et la durabilité des ouvrages. Elles peuvent être seulement inesthétiques.
- Certaines fissures peuvent compromettre la durée de vie des ouvrages.
- Fissures parallèles aux aciers, conduisant à une corrosion rapide de ceux-ci, et à la destruction progressive des structures;
- Fissures permettant des infiltrations d'eau dans des ouvrages qui sont destinés à être étanches ou à contenir des fluides (liquides ou gaz);

Au plus les caractères généraux donnés au-dessus; s'ajouter d'autres Caractères morphologiques d'une fissure, afin de permettre le bon classement et l'analyse du phénomène général de la fissuration, donc on peut citer les caractères de la morphologie suivants [48-49]:

- *L'Orientation*: verticale; horizontale; inclinée; mixte; quelconque.
- *Tracé ou forme*: rectiligne; courbé; quelconque; simple; composé.
- *L'Emplacement*: Il faut effectuer un repérage dans l'élément considéré.
- *L'importance*: en nombre; en longueur; en largeur; et en épaisseur.

2-3-3. Processus de fissuration

Généralement; la fissuration se produit dans un matériau suivant quatre étapes [4, 50]:

➤ La première étape est la plastification locale au voisinage du défaut et singularités géométriques ou matérielles.

➤ La deuxième étape est la formation de fissures suite à des chargements mécaniques, thermiques ou autres qui génèrent des contraintes résiduelles dépassant largement le seuil plastique.

➤ la troisième étape est la propagation de ces fissures conduit à, elle peut être successive ou brutale.

➤ la quatrième étape est une propagation brutale suit généralement une propagation successive, elle peut être accompagnée de grandes déformations (striction), ou sans

déformations importantes (fragile).

2-3-4. Divers types et causes de fissuration:

On peut classer la fissuration du béton en deux catégories[51-54]:

1^{ère} catégorie: les fissures causées par les charges externes appliquées à la structure;

Exemple: fissures dues à la flexion, fissures inclinées dues à l'effort tranchant.

2^{ème} catégorie: les fissures causées par le retrait et celles causées par les effets thermiques.

Le diagramme de la figure 2.9 résume les diverses causes de fissuration du béton frais et du béton durci.

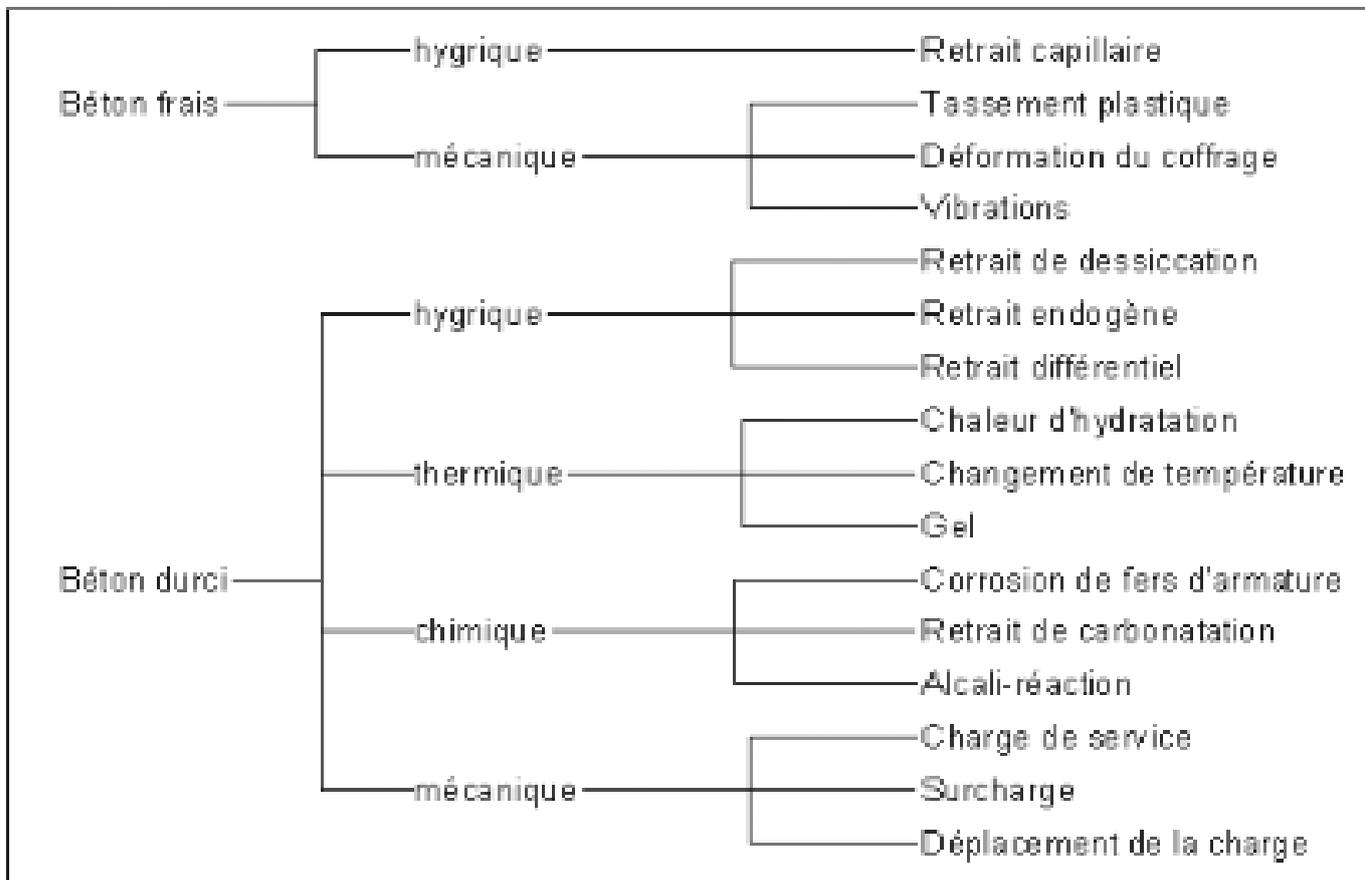


Figure 2.9: Causes de fissuration du béton frais et du béton durci [52].

Le tableau 2.4 donne plus détails sur les causes de fissuration ;

Tableau 2.4: Tableau résumant les différentes causes et périodes d'apparition des fissures[54]

Causes		Période d'apparition	types		
a	Tassement du béton frais	quelques heures	précoces		
b	Retrait plastique	après le bétonnage			
c	Déformations imposées	Retrait thermique	quelques jours après le bétonnage	mécaniques	
		Retrait hydrique	endogène		quelques jours après le bétonnage
			de dessiccation		quelques mois ou années
		Tassement des fondations	selon nature du sol		
		Température, variations climatiques	durant l'utilisation		
d	Charges (poids propre, permanentes, variables)	durant l'utilisation	Physico-chimiques		
e	Corrosion de l'armature	quelques années			
f	Réactions chimiques (alcali-granulats)	après la construction			
g	Gel	-			

Suivant le tableau 2.4; on peut distinguer ces divers types de fissures comme suit [52, 54]:

A- Fissures précoces: apparaissant sur le béton frais, immédiatement ou quelques heures après le bétonnage ; cas (a) et (b) du tableau 2.4.

Ces fissures ont des causes généralement liées aux variations dimensionnelles du béton:

- Avant la prise c'est le ressuage
- Pendant la prise c'est le retrait plastique
- Après la prise c'est la contraction thermique.

Les fissures de retrait plastique se produisent à la surface du béton peu de temps après sa mise en place ou lorsqu'il est encore plastique. Elles sont plutôt discontinues et ne s'étendent pas forcément d'un bord à l'autre de la surface exposée, parallèles les unes aux autres et perpendiculaires à la direction du vent; des fissures de ce type conservent leur forme originale une fois que le béton durci.

On peut voir apparaître ce phénomène chaque fois que:

- Le béton est trop chaud.
- La température extérieure est trop élevée.
- La surface du béton est exposée à un vent sec et au soleil.

Ces fissures sont d'autant plus préjudiciables à la durabilité qu'elles sont précoces car, elles se produisent avant que l'armature ne joue pleinement son rôle. Elles sont alors souvent ouvertes.

B- Les fissures d'origine mécanique: apparaissant sur le béton en voie de durcissement (quelques jours ou semaines après le bétonnage) ou déjà durci (quelques mois ou années après la construction) ; ces fissures sont la conséquence de l'apparition de sollicitations excédant la contrainte de déformation du béton ou sa résistance à la traction.

Dans les structures en béton armé, il existe plusieurs modes de fissures. Parmi ces modes on distingue[50] :

- Fissure par l'écrasement du béton (Figure 2- 10.a).
- Fissure par l'effort tranchant (Figure 2-10.b)
- Fissure par flexion (Figure 2- 10.c).

Dans notre étude on s'intéresse uniquement à la fissuration par flexion des structures en béton durci.

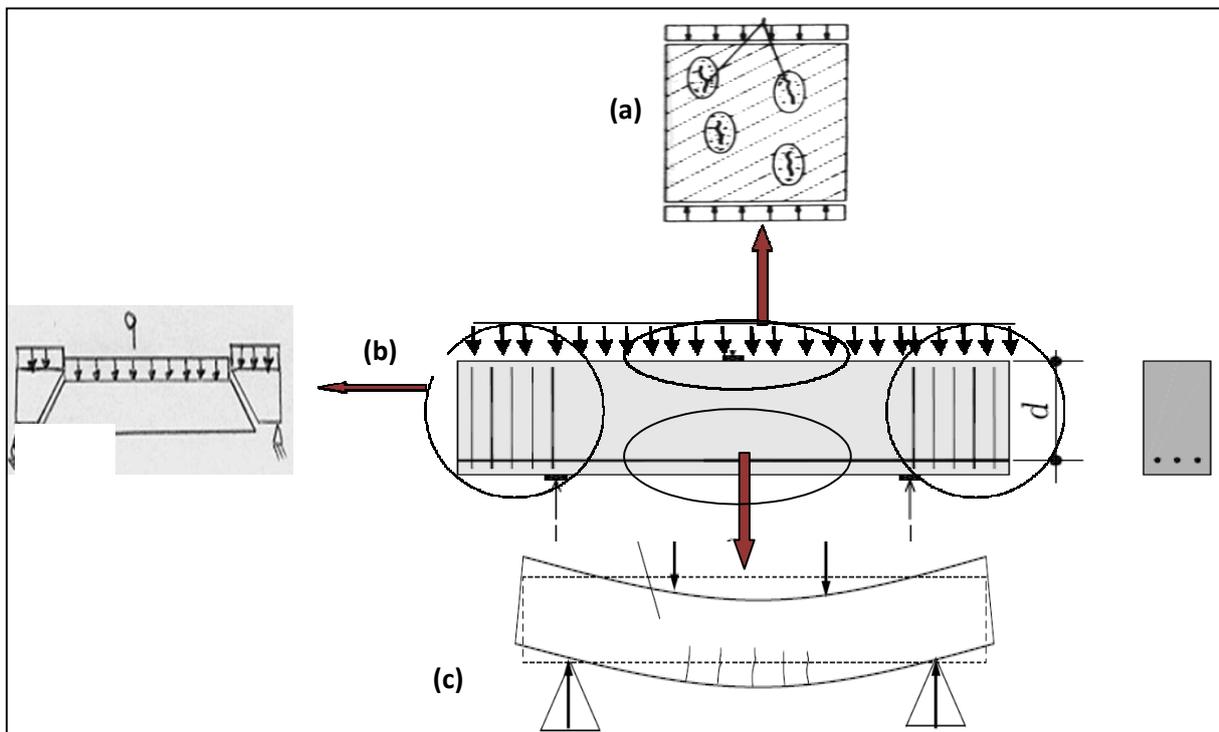


Figure 2- 10: Modes de fissures dans une structure en béton armé. [50]

C- Les fissures d'origine physico-chimique: Apparaissent quelques années après la construction, elles sont la conséquence de phénomènes de gonflement dus à des réactions chimiques (corrosion des armatures, réaction alcali-granulats) ou à des effets physiques (gel de l'eau dans les pores du béton) qui peuvent entraîner une fissuration et un éclatement superficiel du béton d'enrobage.

2-3-5. Traitements de fissuration

Les fissures étant inévitables, elles sont donc traitées par diverses méthodes, afin de rétablir une liaison et une étanchéité, pour éviter la corrosion des armatures par la suite ; Certaines méthodes existent, on trouve[45, 52-54]:

- *L'injection* : une « colle » (classiquement du coulis de ciment) est injectée dans la fissure et vient la boucher. Une liaison est ainsi créée et l'étanchéité est conservée.
- *Le pontage* : pose d'éléments au-dessus des fissures pour les protéger du ruissellement ou de l'infiltration d'eau.
- *La protection superficielle* : recouvrement superficiel des fissures par du mortier, mais malheureusement, les fissures réapparaissent très rapidement avec cette technique.
- *Le traitement général* : pose de plusieurs revêtements étanches, imperméabilisants et esthétiques pour cacher les fissures.
- *L'installation de joint de dilatation* permettant au béton de se dilater dans le temps sans fissurer. Ces joints doivent recouper les dalles béton en surface ne dépassant pas les 30/35 m².
- Le bon dimensionnement *d'armatures de couture* permet de minimiser la fissuration dans la vie l'ouvrage.
- *L'ajout des fibres* dans la matrice béton est l'un des solutions récemment utilisé dans le domaine de la construction pour avoir un béton moins fissuré et bon résisté à la fissuration [4, 42, 43,49,54].

L'incorporation des fibres -de courtes dimensions- favorise la présence de plusieurs fibres autour des fissures, ce qui fait la probabilité d'une augmentation par la suite de nombre de fibres constituant des ponts ou des liaisons entre les lèvres des fissures, ces ponts arrêtant ainsi la propagation des microfissures (figure 2-11).

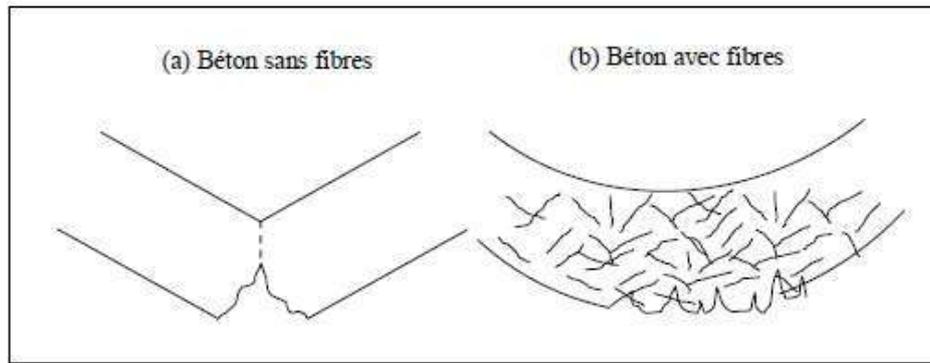


Figure 2-11 : Comportement du béton à la rupture [49].

2-3-6 .Fissuration d'un béton de fibre:

L'incorporation des fibres dans la matrice du béton augmente sa résistance à la fissuration et limite la propagation des fissures [43].

ANDONIAN et al. [55], constatent l'existence de peu des travaux de recherche qui traite la fissuration des bétons de fibres végétales. La plupart des travaux de recherche ont été effectués sur les bétons de fibres d'amiante, d'acier ou de verre. Ils révèlent que le béton de fibres de cellulose résiste aussi à l'effort de fissuration mais reste inférieur à celui des bétons de fibres d'acier. Cela est probablement dû au pouvoir d'absorption d'eau des fibres de cellulose, qui influe sur l'humidité à l'intérieur du béton et diminue la résistance à la fissuration. Cette supposition a été critiquée par KHENFER et al. [56], qui constatent que la variation d'humidité dans la matrice béton de fibres de cellulose n'a aucune influence défavorable sur l'initiation de la propagation de fissure. En revanche, la variation de la longueur des fibres influe beaucoup sur le mécanisme de rupture. À cet effet, ils [56] concluent que les fibres de cellulose courtes donnent une rupture par déchaussement alors que les fibres longues donneraient une rupture par fracture des fibres.

BALUCH [57], trouve que le béton de fibre de sisal présente le 1/10 de la résistance à la fissuration de celle des bétons de fibres d'acier.

2-4. Conclusion

Nous avons donné dans ce chapitre des notions générales sur les deux déformations (retrait, et fissuration) qui influent sur les bétons et les mortiers notamment ceux qui sont conservés dans des conditions climatiques sévères d'une humidité basse et d'une température assez élevée.

Bien que les fibres accélèrent un peu le départ de l'eau, le retrait des bétons et les mortiers renforcés par les fibres diminuent, cette diminution ne dépend pas seulement de l'utilisation

des fibres mais elle dépend aussi d'autres facteurs de l'environnement et de la composition du béton lui-même, ces paramètres et leurs influences sont regroupés dans le tableau 2-5.

Tableau 2-5: Résumé des observations sur les paramètres qui influencent le retrait

paramètres	Observations sur l'influence
Mode de conservation	La réduction du retrait avec la conservation dans un endroit humide
La composition du béton	La nature et la grosseur des agrégats utilisés, le rapport E/C, le dosage et le type de ciment, l'ajout de fumée de silice, les adjuvants, les fibres ... sont des facteurs d'influence essentiels.
<u>Facteurs liés aux fibres :</u> La nature	le retrait est varié suivant la nature des fibres utilisées, à titre d'exemple : Les bétons de jute et de noix de coco présentent un retrait inférieur de 50 et 70% par rapport au témoin.
La longueur	Le retrait final diminué avec l'augmentation de la longueur des fibres.
Quantité des fibres.	Existence d'une relation proportionnelle entre la quantité des fibres et le retrait.
Blanchissement des fibres	La diminution du retrait par le blanchissement.

La fissuration peut être causée par des facteurs physiques tels que le retrait ou par des facteurs mécaniques directement liés au chargement. Une fissuration non prise en considération (non contrôlée) lors de la conception de la structure peut provoquer des effondrements et donc provoquer des dégâts.

Comme le retrait, la fissuration du béton est un phénomène très complexe qui dépend de nombreux facteurs selon le type de fissuration

Dans ce chapitre nous avons donné aussi les principales méthodes de traitement de fissuration, parmi lesquelles : l'utilisation d'un béton à base des fibres, ces derniers éléments travaillent comme des ponts ou des liaisons entre les lèvres des fissures, qui arrêtant ainsi la propagation des microfissures.

Généralités sur la modélisation des retraits et des fissurations

3-1.Introduction

Le calcul des structures et l'analyse des phénomènes complexes dans le domaine de génie civil (exemple : retrait, fissuration, fluage, fatigue...) se ramène toujours à un problème d'algèbre faisant intervenir un nombre plus ou moins grand de variables. Il est donc plus aisé d'écrire un programme permettant la résolution numérique de ce problème au moyen d'un ordinateur en un temps très court.

Pour effectuer ces calculs, ils existent plusieurs méthodes, telle que la méthode des éléments finis. [59 -67], mais avant de calculer, il faut modéliser le comportement, en se basant sur des discrétisations ou bien sur des observations empiriques après plusieurs itérations (répétitions).

La modélisation numérique a permis, grâce au développement fulgurant de l'informatique, d'apporter des solutions techniques et de révolutionner les procédés de travail dans le domaine des géo-matériaux (comportement et rhéologie des matériaux de construction, bétons et matériaux composites,...)

Dans la littérature, on trouve de nombreux modèles pour décrire le retrait et la fissuration en flexion du béton ordinaire [34,36,60-77] et même une extension de l'application de ces modèles pour les bétons de fibres métalliques, malheureusement, ce n'est pas le cas pour les bétons de fibres végétales.

Pour cela, nous constatons que la modélisation des phénomènes de déformabilité est un axe de recherche très important ; ainsi il faut d'une part ; intensifier les recherches pour une meilleure compréhension de ce sujet et d'autre part avoir des nouvelles approches de modélisation basées sur des modèles physiques ou mathématiques très avancés.

Dans cet élan, les références bibliographiques présentent des informations de démarrage très importantes sur la modélisation du retrait et la fissuration du béton de fibre.

3-2. Définitions

3-2-1. Le modèle

Le mot modèle possède plusieurs définitions [60-62] nous citons par exemple [44] :

- C'est une forme analytique représentative du phénomène physique ou mécanique.

- Un modèle est une représentation d'un système (réel ou imaginaire) dont le but est d'expliquer et de prédire certains aspects du comportement de ce système. Cette représentation est plus ou moins fidèle car, d'une part le modèle devra être assez complet afin de pouvoir répondre aux diverses questions qu'on peut se poser sur le système qu'il représente, et d'autre part il ne doit pas être trop complexe pour pouvoir être facilement manipulé. Ceci implique immédiatement qu'il y a intérêt à bien définir les limites ou frontières du modèle qui est censé représenter le système.

3-2-2. Etapes de construction du modèle

La production d'un modèle exige le respect des étapes suivantes : [60]

1. Position du problème et définition de l'objectif ;
2. Description physique qualitative du phénomène (compréhension avec lecture ou observation) ;
3. Identification des paramètres physiques qui influent sur le phénomène ;
4. Détermination des relations entre paramètres ;
5. Formulation des hypothèses ;
6. Formulation des équations ;
7. Résolution des équations ; et
8. Validation des résultats.

3-2-3. La modélisation :

La modélisation est la démarche ou le processus scientifique conduisant à la connaissance, et à l'obtention de la loi réagissant un phénomène physique [60,63], c'est la meilleure représentation de ce dernier.

La distinction entre le modèle physique [60,61] et le modèle mathématique [62,64] c'est que pour le modèle physique on cherche de construire à l'échelle réduite un ouvrage similaire à l'ouvrage réel c'est-à-dire une reproduction du phénomène physique sur le modèle réduit.

Le modèle mathématique [60, 62,64] permet l'évaluation et de la description quantitative du phénomène physique.

Généralement, l'objectif principal de la modélisation est:

- La prédiction des événements futurs pour une meilleure sécurité et des conditions économiques favorables ; et
- La maîtrise des processus dans toutes les disciplines

La figure (3.1) présente le schéma du principe logique à la base de la recherche des modèles.

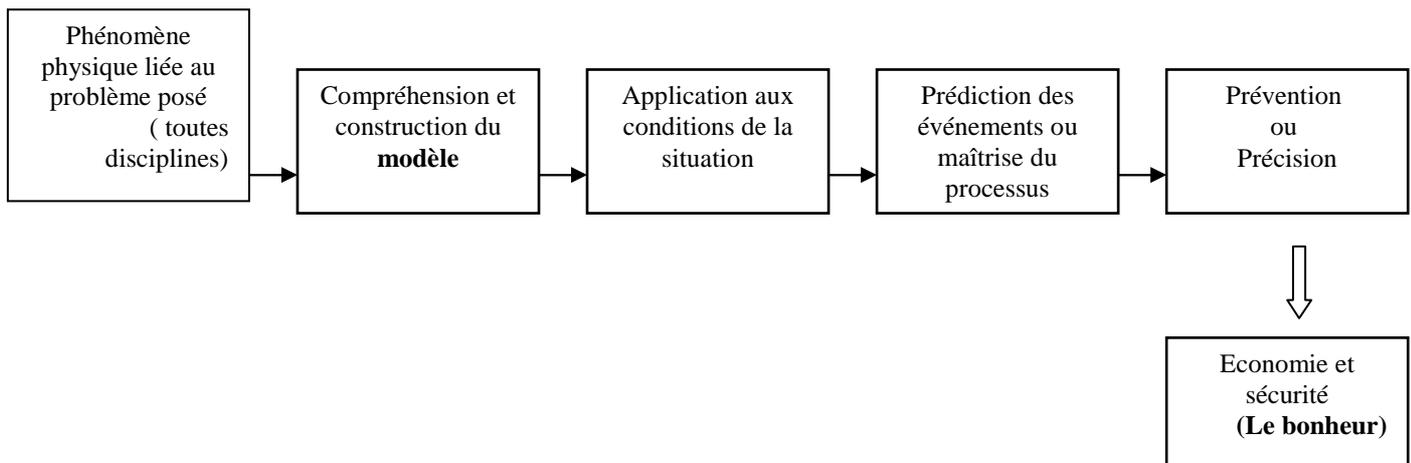


Figure 3-1 : Schéma du principe logique à la base de la recherche des modèles

HAFSI [60] a résumé dans la figure (3-2) le principe d'évolution dans la compréhension du phénomène afin d'établir un modèle.

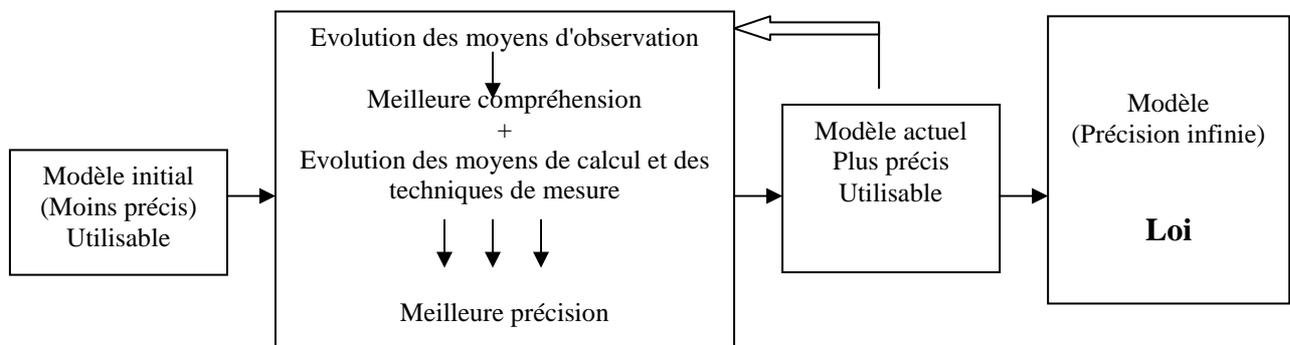


Figure 3-2 : Schéma de l'évolution du modèle vers la loi

3-3. Modélisation du retrait :

3-3-1. Introduction

Nous rappelons que l'étude du renforcement de bétons par les fibres de palmier dattier pour l'amélioration du retrait dans les régions désertiques est un axe de recherche assez nouveau, pour cela, avant de passer à la modélisation des résultats expérimentaux du retrait de

béton renforcé par ces fibres, nous exposons quelques modèles de la littérature concernant le retrait du mortier et béton ordinaires et de fibres.

3-3-2. Modélisation du retrait d'un béton classique

3-3-2-1. Forme analytique du KEDJOUR

Pour une bonne modélisation analytique du retrait, il faut revenir aux lois qui gèrent le comportement des matériaux composites, en l'occurrence son squelette solide (ciment et granulats), ainsi que sa phase fluide.

Dans ce qui suit, nous exposons la théorie de KEDJOUR [34].

Considérons une section plane à l'intérieur du ciment, elle coupe le squelette suivant une section Ω et le liquide suivant ω . Si π est la tension moyenne qui règne dans ce dernier (liquide), la compression moyenne P dans le squelette est donnée par :

$$P = \pi \frac{\omega}{\Omega} \quad (3-1)$$

Le retrait Δ est donné par :

$$\Delta = \pi \frac{\varepsilon}{V} x \quad (3-2)$$

Avec :

ε : le volume de liquide

V : volume total apparent

x : coefficient de compressibilité volumétrique du liquide

Relation entre le retrait et la tension de vapeur de milieu :

D'après [34], la loi de lord KELVIN pour l'étude de l'ascension capillaire des liquides est donnée par :

$$\pi = \alpha \cdot \log \theta \quad (3-3)$$

Où α : une constante qui dépend de la concentration du liquide

θ : la tension de vapeur relative à l'atmosphère par rapport à celle de la vapeur saturée du même liquide.

De (3-2) et (3-3) on obtient:

$$\Delta = x \frac{\alpha \varepsilon}{V} \log \theta \quad (3-4)$$

Par ailleurs:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_c - \varepsilon_a \quad (3-5)$$

Où : ε : volume de liquide ou quantité d'eau

ε_0 : eau de gâchage.

ε_c : eau adsorbée dans la combinaison chimique du ciment

ε_a : eau évaporée.

D'où on obtient :

$$\Delta = \alpha x \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_c - \varepsilon_a}{V} \log \theta \quad (3-6)$$

L'expérience montre [34] que la quantité d'eau évaporée à chaque instant t est :

$$\varepsilon_a = a(1 - \theta)\varphi(t) \quad (3-7)$$

où : a : la quantité d'eau maximum évaporée (théoriquement) pour $t \rightarrow \infty$

$$\varphi(t) : \text{Fonction indépendante de } \theta \text{ avec } \begin{cases} \varphi = 0 \rightarrow t = 0 \\ \varphi = 1 \rightarrow t = \infty \end{cases}$$

Suivant la loi de DALTON : la vitesse d'évaporation à un instant t est proportionnelle à la différence entre la tension du vapeur de l'atmosphère et celle du liquide.

$$\frac{d\varepsilon_a}{dt} = AS(\theta - \tau) \quad (3-8)$$

Avec :

S : surface d'évaporation : surface externe de la pièce

τ : tension de vapeur près de la surface de liquide reliée à sa tension interne ω par l'expression :

$$\omega = \alpha \cdot \log \tau \quad (3-9)$$

A partir des équations (3-7) et (3-8) on tire :

$$\tau = \theta - \frac{a}{AS} (1 - \theta) \frac{d\varphi}{dt} \quad (3-10)$$

$$\text{Les conditions au limite sont } \begin{cases} t = 0 \begin{cases} \varphi = 0 \\ \varphi' = -\frac{AS}{a} \end{cases} \\ t \rightarrow \infty \begin{cases} \varphi = 1 \\ \varphi' = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3-11)$$

D'après [51], $\varphi(t) = 1 - e^{\left(-\frac{AS}{a}t\right)}$ qui donne :

$$\varepsilon_a = a(1 - \theta) \left(1 - e^{-\frac{AS}{a}t} \right) \quad (3-12)$$

$$\tau = \theta + (1 - \theta)e^{-\frac{AS}{a}t} = 1 - \frac{\varepsilon_a}{a} \quad (3-13)$$

L'expression générale du retrait devient dans ces conditions pour **un ciment durci** préalablement dans l'eau :

$$\Delta = \frac{\alpha x}{V} \left[\varepsilon_e - a(1 - \theta) \left(1 - e^{-\frac{AS}{a}t} \right) \right] \log \left[\theta + (1 - \theta)e^{-\frac{AS}{a}t} \right] \quad (3-14)$$

$$\text{Pour } t \rightarrow \infty \quad \Delta = \frac{\alpha x}{V} [\varepsilon_e - a(1 - \theta)] \log \theta \quad (3-15)$$

On ne peut pas appliquer l'expression (3-15) dans le cas des faibles hydrométries ($\theta=0 \Rightarrow \Delta = \infty$), pour éviter ce problème on devrait remplacer θ par une fonction $f(\theta)$ qui est donnée par l'expression suivante :

$$f(\theta) = \theta + \frac{1}{(a + \theta)^n} - \frac{1}{(a + 1)^n} \quad (3-16)$$

Avec:

$$\begin{cases} f(\theta) = \theta_0 & \text{pour } \theta=0 \\ f(\theta) = 1 & \text{pour } \theta=1 \end{cases}$$

Ces formules sont applicables pour une pâte de **ciment** dans les conditions hygrométriques bien définies.

Lorsque l'on ajoute au ciment des matériaux inertes de grosseurs et de natures diverses, on le transforme en béton. Dans ce cas, la matière inerte est en quantité plus abondante que le liant et, pour passer du retrait de l'un au retrait de l'autre, on utilise la relation suivante qui découle de la comparaison des modules de compressibilité

$$\Delta_b = \Delta_c \frac{V_c + \varepsilon_0}{K(1 - V_0)} \quad (3-17)$$

Avec :

Δ_b : Retrait du béton.

Δ_c : Retrait du ciment.

V_c : est la proportion de ciment

V_0 : la proportion des vides.

K : coefficient qui provient de la nature élastique de l'agrégat égal à (1.5- 03)

Si l'agrégat est une poudre inerte de même granulométrie que celle du ciment, il joue dans celui-ci un rôle entièrement analogue à celui de l'eau, car il est incapable de contribuer à l'édification du squelette.

En définitive, [34] a adopté la formule de comparaison suivante où toutes les quantités volumétriques sont prises en considération

$$\Delta b = \left(\frac{\varepsilon_0}{V_c} \right)^{3/2} K \frac{V_c + \varepsilon_0}{(1 - V_0)} \Delta_0 \quad (3 - 18)$$

Où Δ_0 est le retrait de référence d'une pâte pure dans des conditions hygrométriques données.

3-3-2-2. Prévision du ACI 209R-92

La norme ACI 209R-92 donne une équation générale permettant de prévoir le retrait (d'après [35]); Selon cette norme, le développement du retrait en fonction du temps répond à l'équation suivante :

$$S_t = \frac{t}{35 + t} S_{ult} \quad (3 - 19)$$

Où:

S_t : retrait après j jours.

t : nombre de jours après la fin d'un mûrissement humide de 07 jours.

S_{ult} : retrait final.

Pour un béton mûri à la vapeur l'équation (3 -19) devient:

$$S_t = \frac{t}{55 + t} S_{ult} \quad (3 - 20)$$

3-3-2-3. Le modèle BP (Bazant et Pannula) [36]

Le modèle BP (Bazant et Pannula) est basé sur : La composition du mélange, la résistance, l'âge en début de séchage, les conditions de conservation, et les dimensions et la forme des pièces..

Les étapes de calcul à suivre sont les suivantes :

1. Calcul du facteur K_s : fonction de la forme

$$K_s = 1.55 + 0.45 \left(\frac{D}{H} - 1 \right) \quad \text{Pour les éprouvettes cubiques} \quad (3 - 21)$$

$$K_s = 1.30 + 0.23 \left(\frac{D}{H} - 1 \right) \quad \text{Pour les éprouvettes sphériques} \quad (3 - 22)$$

si $\frac{D}{H} \cong 1$ le facteur K_s est pris égal à 1.55 et 1.30 respectivement pour des éprouvettes cubiques et sphériques

Avec :

H : longueur de l'éprouvette

D : épaisseur effective, qui est donné par :

$$D = 2 \frac{V_s}{s} \quad (3 - 23)$$

Où:

V_s : est le volume de l'éprouvette

s: la section transversale

2. Calcul du K' : fonction de la température ambiante

$$K' = \frac{T}{T_0} \exp \left(\frac{5000}{T_0} - \frac{5000}{T} \right) \quad (3 - 24)$$

T: température ambiante en Kilven

T_0 : 273 K

3. La fonction de l'âge $C(t)$

$$C(t) = C7 \cdot K' \left[0.05 + \left(\frac{6.3}{t} \right)^{1/2} \right] \quad (3 - 25)$$

$$C7 = 0.125 \left(\frac{E}{C} \right) C - 12 \quad 07 \leq C7 \leq 21 \quad (3 - 26)$$

Avec:

t : le temps

E/C : rapport eau/ciment

C : dosage en ciment Kg/m³

4. Calcul du τ_s

τ_s est un coefficient fonction de la dimension de l'éprouvette qui peut être exprimé par :

$$\tau_s = 600 \left(\frac{Ks}{150} D \right)^2 \frac{Cr}{C(t)} \quad (3 -27)$$

Avec :

$$Cr = 10 \text{ mm/jour}$$

5. Le facteur $Q(t^*)$ facteur en fonction du temps

$$Q(t^*) = \left(\frac{t}{\tau_s + t_0} \right)^{1/2} \quad (3 -28)$$

Où t_0 est le temps initial en jour correspond à la première lecture

6. Fonction de l'humidité ambiante Kh

$$\begin{cases} Kh = 1 - eh^3 & eh \leq 0.98 \\ Kh = -0.2 & eh = 1.00 \end{cases} \quad (3 -29)$$

Avec eh est l'humidité relative

7. Le retrait ultime

$$\epsilon_{su} = \epsilon_u \frac{E(607)}{E(t + \tau_s)} \quad (3 -30)$$

Dans laquelle la valeur de la fonction E peut être exprimée par :

$$E(t') = E(28) \left[\frac{t'}{4 + 0.85t'} \right]^{1/2} \quad (3 -31)$$

L'équation (3 -30) du retrait ultime ϵ_{su} devient

$$\varepsilon_{su} = \varepsilon_u \cdot \frac{E(28) \cdot \sqrt{\frac{607}{4 + 0.85(607)}}}{E(28) \cdot \sqrt{\frac{t + \tau_s}{4 + 0.85(t + \tau_s)}}} \quad (3 - 32)$$

D'où on obtient:

$$\varepsilon_{su} = 1.0805 \cdot \varepsilon_u \sqrt{\frac{4 + 0.85(t + \tau_s)}{t + \tau_s}} \quad (3 - 33)$$

Où:

$E(t')$: est le module d'Young correspondant à l'âge du béton.

$E(28)$: est le module d'Young du béton à 28 jours.

ε_u : est exprimé par cette formule:

$$\varepsilon_u = 1210 - 880 y \quad (3 - 34)$$

Avec :

$$y = (390z^{-4} + 1)^{-1} \quad (3 - 35)$$

$$z = \left[1.25 \left(\frac{A}{C} \right)^{1/2} + 0.5 \left(\frac{G}{S} \right)^2 \right] \left(\frac{1 + \left(\frac{S}{C} \right)}{E/C} \right)^{1/3} (f'_c)^{1/2} - 12 \quad (3 - 36)$$

Avec :

C : quantité de ciment en Kg/m³

E/C : eau/ciment

A/C : granulats/ciment

G/C : gravier/ ciment

S/C : sable/ciment

f'_c : résistance du béton à 28 jours en Ksi (1Ksi=6.895 Mpa)

Tous les rapports sont exprimés en poids

8. Détermination du retrait du béton témoin

L'expression qui permet une représentation adéquate du retrait d'un béton normal est :

$$\varepsilon_s(t_0) = \varepsilon_{su} \cdot Kh \cdot Q(t) \quad (3 - 37)$$

$$\varepsilon_s(t_0) = 1.0805 \cdot \varepsilon_u \cdot Kh \cdot \sqrt{\frac{t}{\tau_s + 1}} \cdot \sqrt{\frac{4 + 0.85(t + \tau_s)}{t + \tau_s}} \quad (3 - 38)$$

3-3-2-4. Les modèles Eurocode2 (EC2) et le modèle B3 du ACI 209 [69]

Pour acquérir de la connaissance des problèmes de prédiction de retrait, dû à une température et humidité relative variables, un programme commun de la recherche a été exécuté dans les universités Belges: Université Gent (UG) et Université Catholique de Louvain (UCL). Dans ce qui suit une présentation d'un résumé des résultats du UCL qui était l'initiateur du projet d'après [53].

De plus, Eurocode2 et B3 Modèle d'ACI, ils ont été utilisés pour prédire le comportement retrait du béton.

Le tableau (3-1) montre les paramètres pris en considération pour chaque modèle [69]

Tableau 3-1 : Les variables des modèles EC2 et B3 [69]

Les paramètres	EC2	B3
Résistance à la compression	x	x
E/C	-	-
Eau de gâchage	-	x
Type de ciment	x	x
Section transversale	x	x
Type de l'éprouvette	-	x
humidité relative	x	x
Age du béton au début de la prise	x	x
Condition de la cure	-	x

A partir de ce tableau, il est clair que le modèle EC2 est moins compliqué que B3, parce qu'il utilise moins de paramètres.

Le tableau (3-2) donne la composition des trois types de béton (A1, A2 et, A3) utilisés pour la modélisation

Tableau 3-2 : Proportions des composants et propriétés mécaniques des bétons [69]

paramètres		Type de béton		
		A1	A2	A3
Graviers 4/14	(kg/m ³)	1280	1240	1200
Sable	(kg/m ³)	640	620	600
Ciment CPA CEM I 42.5	(kg/m ³)	280	350	425
Eau	(kg/m ³)	168	175	170
E/C		0.6	0.5	0.4
f_{c28}	(N/mm ²)	30.2	40.4	51.0

La déviation du modèle suivant les données expérimentales est caractérisée par un coefficient de comparaison ϖ qui est défini par le facteur de position j.

$$\varpi_j = \frac{1}{J_j} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^j (\omega_{ij} \Delta_{ij})^2 \right]^{1/2} \quad (3-39)$$

Où :

$$J_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{ij} J_{ij} \quad ; \quad \omega_{ij} = \frac{n}{n_d - n_1} \quad (3-40)$$

J_{ij} sont les valeurs mesurables (tension de retrait, 1+ coefficient de fluage)

n : le nombre de tout les points donnés pour une position précise de j.

Δ_{ij} : la déviation de la valeur du modèle et la valeur mesurée

ω_{ij} : la puissance fixée pour des points donnés

n_d : le nombre de logarithme décimal du temps pour la position j.

n_1 : est le nombre des données des points dans les dizaines de points où i est indiqué.

Le coefficient de variation total de la déviation du modèle est défini par :

$$\varpi_{tot} = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^N \varpi_j^2 \right]^{1/2} \quad (3-41)$$

où :

N : est le nombre total des positions utilisées.

La statistique d'erreur et la comparaison des résultats d'essais pour le modèle EC2 et B3 respectivement, sont données par le tableau (3-3), qui montre les coefficients de variation des déviations des deux modèles par rapport aux valeurs mesurées.

Tableau 3-3 : Coefficient de variation d'erreurs (en %) pour le retrait des bétons A1, A2 et A3[69]

Type de béton	Le modèle EC2	Le modèle B3
A1	51.3	65.5
A2	53.9	58.3
A3	65.5	63.2
$\bar{\omega}_{tot}$	57.2	62.4

Une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs des deux modèles est schématisée sur la figure (3-3), cette dernière montre que :

- Les valeurs mesurables pour le béton A2 et A3 sont égales; mais elles sont plus ou moins inférieures respectivement aux valeurs de A1.
- Pour le modèle EC2 et B3, une meilleure modélisation de A1 pour un âge supérieur à 1000 jours est remarquée, mais contrairement pour un intervalle du temps entre 0 et 500 jours.
- Il apparaît clairement que les deux modèles EC2 et B3 marquent des valeurs inférieures pour A2 et A3 par rapport aux valeurs mesurables, mais cette déviation n'est pas trop large pour EC2 avec un âge au-dessus de 150 jours
- La prédiction du retrait correspondant au modèle B3 est presque la même pour les deux compositions du béton A1 et A2

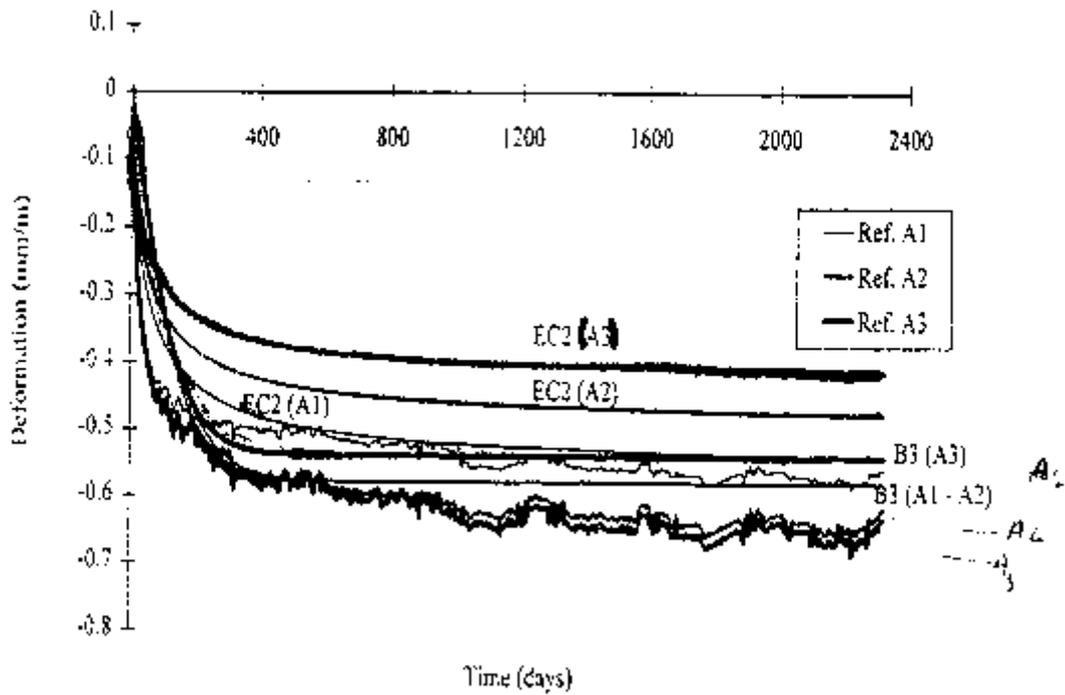


Figure 3-3 retrait de béton pour les mesures expérimentales et des modèles : ACI et B3[69]

3-3-2-5 Approche de détermination du retrait d'un mortier

A) - Détail expérimental :

Une approche qui détermine le retrait endogène de mortier à jeune âge avec l'enregistrement de la température a été entamée par [70], les caractéristiques du mortier étudié sont :

- La composition du mortier étudié est donnée sur le tableau (3-4)
- Le ciment est de type (CPA CEM 52.5 R) avec les proportions :
 - C₃S = 66.9%
 - C₃A = 4.35%
 - C₄AF = 1%
- Les agrégats de type quartzeux de dimension maximale 4 mm.
- Le temps de malaxage à sec (ciment + sable) est de 01 min

Tableau 3-4 : Composition du mortier

Ciment (Kg/cm ³)	Agrégats (Kg/cm ³)	Eau (Kg/cm ³)	E/C
700	1216	245	0.35

Les mesures de changement du volume externe du mortier causées par les réactions d'hydratations du ciment ont été prises en pesant hydrostatique. Le principe de cette méthode consiste à mesurer les variations de la flottabilité de l'échantillon à un âge très tôt.

Le mortier étudié (300 à 400g) est introduit dans un préservatif. Le plus grand soin est exercé pour évacuer l'air.

Les éprouvettes sont de forme cylindrique avec les dimensions : 110 x 220 mm

Dans cette approche, deux notions essentielles sont utilisées [53] à savoir :

- Déformation totale : déformation mesurée de mortier causée par les réactions du ciment qui inclue des déformations de retrait et des déformations thermiques.
- Retrait : la différence entre la déformation totale et la déformation thermique qui était calculée par le TDC (Thermal Dilatation Coefficient).

B)- Modélisation des résultats :

Durant les essais iso-thermiques à 20°C, la valeur marquée sur la balance donne directement le changement de volume de l'échantillon (la gravité spécifique de l'eau est constante). Pour cette étude la température de l'eau varié sensiblement de 20°C à 65°C

La formule qui donne la densité de l'eau $\rho_e(t)$ entre une température de 17°C à 100°C est la suivante :

$$\rho_{\omega}(t) = 1 - \frac{(T - 3.982)^2 T + 273350 - T}{466.700T + 67350 - T} \quad (3 - 42)$$

La déformation du mortier est donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{\rho_{i\omega}}{\rho_{\omega(T)}} - 1 \right) - \frac{M_r}{V_i \rho_{\omega(T)}} \right] \quad (3 - 43)$$

où :

T : Température du bassin en C°

$\rho_{i\omega}$: Densité initiale de l'eau (g/cm³)

V_i : Volume initial de l'échantillon (cm³)

$\rho_{\omega(T)}$: Densité de l'eau en fonction de la température (g/cm³)

\mathcal{E} : Déformation du mortier (μ m/m)

M_r : Lecture de la masse sur la balance.

La déformation totale est la somme de la déformation thermique qui dépend de TDC du mortier et du retrait

$$TDC(t) = 77.e^{\frac{0.75-t}{2.5}} + 10 \quad (3 - 44)$$

Avec :

TDC en ($\mu\text{ m/m/C}^\circ$)

t : âge du mortier (h)

Les mesures expérimentales de TDC sont données sur le tableau (3-5)

Tableau 3-5 : Les mesures expérimentales de TDC

Age(h)	0.75	1	2	3	4	5	6
TDC($\mu\text{ m/m}^\circ\text{C}$)	87	80	61	50	25	21	15

Le retrait est obtenu par une substraction de la déformation thermique à la déformation totale mesurée

$$\mathcal{E}_r(t) = \mathcal{E}_{tot} - \mathcal{E}_{(n)} \quad (3-45)$$

Avec:

$$\mathcal{E}(n) = \mathcal{E}(n-1) + \left[[T(n) - T(n-1)] \frac{TDC(n) + TDC(n-1)}{2} \right] \quad (3-46)$$

où :

\mathcal{E}_{tot} : la déformation totale

$\mathcal{E}(n)$: la déformation thermique pour une période n

T(n) : la température

TDC(n) : coefficient de dilatation thermique

Les résultats de la modélisation sont illustrés sur la figure (3-4)

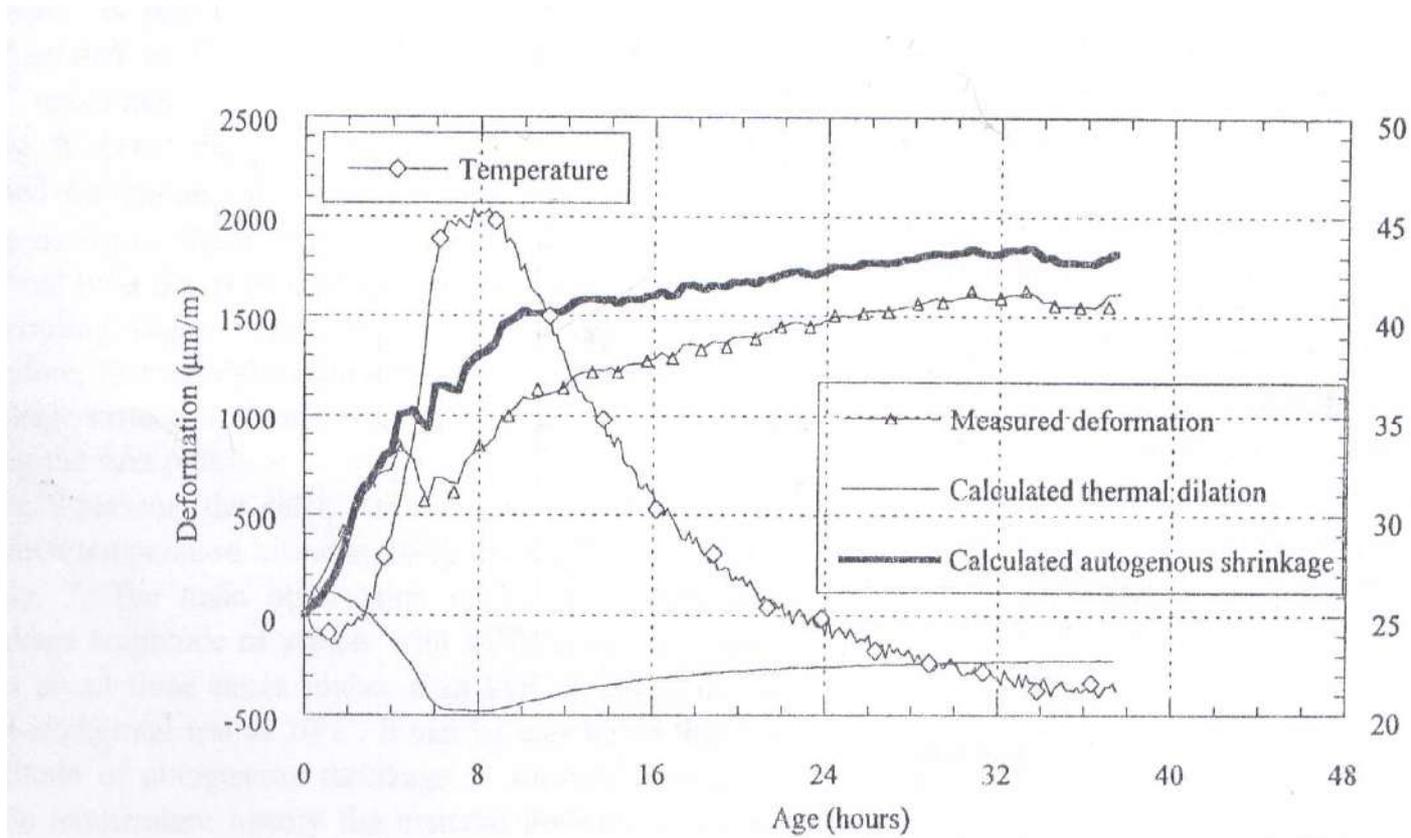


Figure 3-4 : Séparation de déformation thermique et du retrait [70]

3-3-2-6. Modèle AFREM pour les bétons à hautes performances

D'après [71], il est possible de relier le retrait endogène au degré d'avancement de l'hydratation du ciment par l'application du modèle AFREM (Association française de Recherche et d'Essais sur les Matériaux de construction), celle-ci néglige le retrait pour les faibles degrés d'hydratation, le calcul est une fonction linéaire du degré d'avancement jusqu'à 28 jours, au delà des 28 jours l'évolution est une fonction exponentielle :

$$\text{Pour } t < 28 \text{ j} \quad (3-47)$$

$$\text{- si } r(t) < 0.1 \quad \varepsilon_{re} = 0$$

$$\text{- si } r(t) > 0.1 \quad \varepsilon_{re} = [R_c(28j) - 20] [2.2 r(t) - 0.2] 10^{-6}$$

$$\text{Pour } t > 28 \text{ j} \quad (3-48)$$

$$\varepsilon_{re} = [R_c(28j) - 20] \cdot [2.8 - 1.1 \exp(-t/96)] 10^{-6}$$

Avec :

ε_{re} : déformation du retrait

$r(t)$: le degré d'avancement, ce dernier peut être défini de plusieurs manières :

- Rigoureusement : comme rapport entre la quantité de ciment ayant réagi à l'instant t et la quantité de ciment initial :

$$r(t) = \frac{C_{mh}(t)}{C_m} \quad (3-49)$$

Avec :

$C_{mh}(t)$: masse de ciment hydraté à l'instant t

C_m : masse de ciment initial.

- Chimiquement : pour suivre l'hydratation, il est commode de suivre l'évolution de la quantité d'eau chimiquement liée, le degré d'avancement peut être défini comme le rapport :

$$r(t) = \frac{Wn(t)}{Wn} \quad (3-50)$$

Avec :

$Wn(t)$: eau chimiquement liée à l'instant t

Wn : eau chimiquement liée lorsque l'hydratation est complète.

- Mécaniquement : suivant les études sur l'évolution de la résistance en compression, celle-ci évolue linéairement en fonction du degré d'avancement

$$r(t) = \frac{fc(t)}{fcj} \quad (3-51)$$

Avec :

$fc(t)$: résistance en compression à l'instant t

fcj : résistance en compression finale.

- Thermiquement : puisque les réactions d'hydratation sont exothermiques

$$r(t) = \frac{Q(t)}{Q(\infty)} \quad (3-52)$$

Avec :

$Q(t)$: chaleur dégagée à l'instant t

$Q(\infty)$: chaleur dégagée à l'issue de la réaction

3-3-2-7. Estimation du retrait de béton de sable

Vu le manque des normes relatives au béton de sable (BS), une étude comparative faite par BENAÏSSA et VIGUIER [72] pour situer les déformations différées par les règlements (CEB-FIP pour le retrait et BPEL pour le fluage)

Les compositions de bétons sont illustrées par le tableau (3-6), les éprouvettes sont de formes cylindriques de 16 cm de diamètre et de 100cm de hauteur; conservées sous une humidité de 50%.

Tableau 3-6 : Formulation du béton d'essai. [72]

Sable roulé-siliceux [kg]	Ciment CPJ 45 R PM Usine de Couronne [kg]	Filler MEAC Usine Tour Blanche [kg]	Super-plastifiant HR401-SIKA	Eau	E/C
1550	350	200	7	190	0.54

Suivant le code CEB-FIP, la déformation du retrait s'exprime par:

$$\varepsilon_s(t_1, t_0) = \varepsilon_{s0} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (3-53)$$

Avec

$\varepsilon_{s0} = \varepsilon_{s1} \cdot \varepsilon_{s2}$, Coefficient de base du retrait.

ε_{s1} Dépend du milieu ambiant, sa valeur est donnée par le tableau e.1 du code CEB-FIP.

ε_{s2} Dépend de l'épaisseur fictive h_0 compte tenu du milieu ambiant, se lit sur le graphique de la figure e.5 du code CEB-FIP.:

$$h_0 = \lambda 2A_c / U \quad (3-54)$$

Où :

A_c : aire de la section de la pièce.

U : périmètre de la pièce en contact avec l'atmosphère.

t et t_0 représentent les instants entre lesquels le retrait est calculé. La fonction $\beta_s(t)$ est représentée sur l'abaque de la figure e.6 du code CEB-FIP sur laquelle la courbe correspondant à l'épaisseur fictive h_0 de la pièce, a été choisie.

L'ensemble des valeurs réglementaires et expérimentales sont illustrées par les courbes de la figure (3-5)

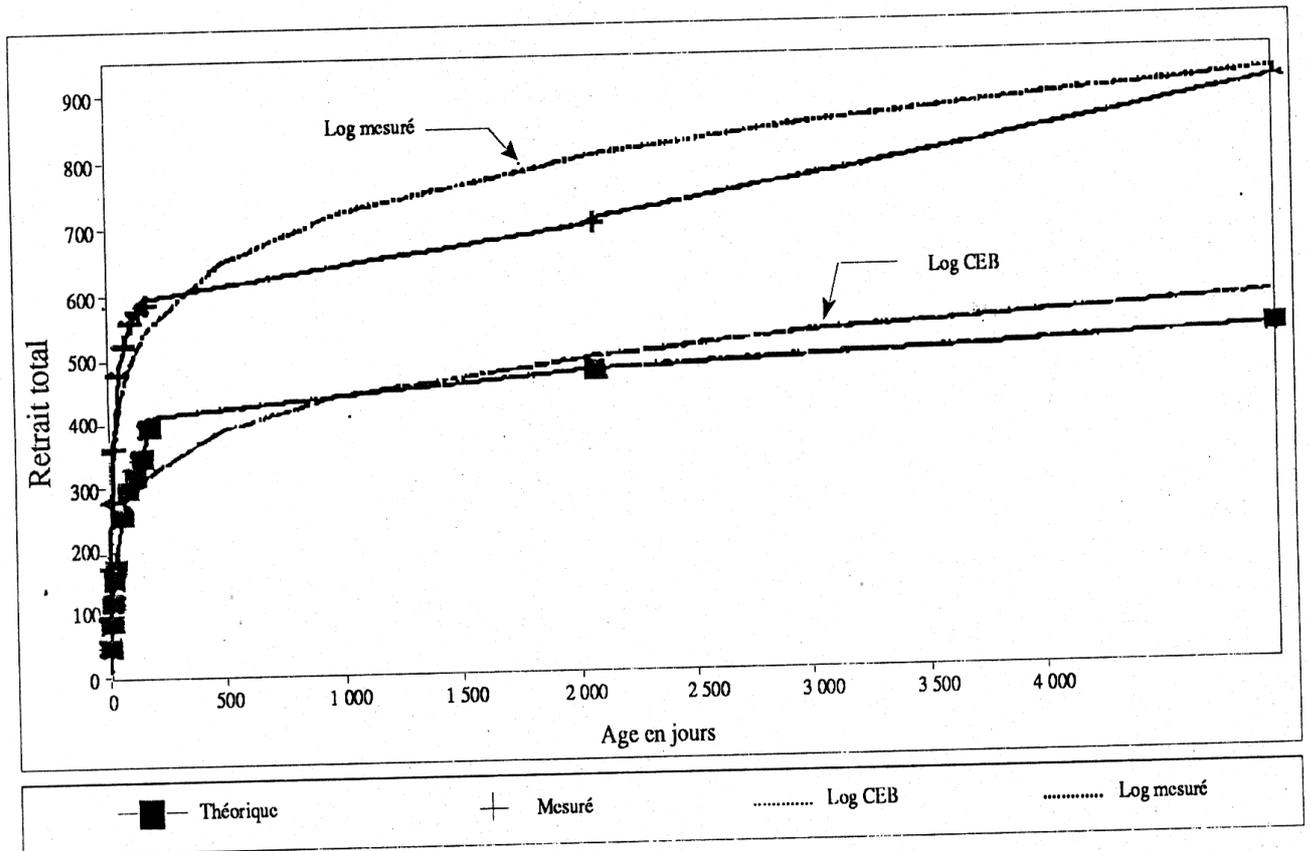


Figure 3-5 : Estimation de la compatibilité retrait CEB-FIP –retrait expérimental [72]

Le règlement CEB-FIP sous –estime les valeurs pendant la durée de l’essai, cette sous-estimation passe de 50% au jeune âge (3 jours) à 33% en fin d’essai (186 jours) comme indique le tableau (3-7)

Tableau 3-7 : Retraits expérimental et réglementaire du B.S [72]

Age (jours)	3	7	21	28	60	90	120	150	186	2083
retrait expérimental $\epsilon_r(t)$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	100	184	289	371	492	534	570	584	594	697
Retrait CEB-FIP $\epsilon_s(t)$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	50.40	90.72	161	181.44	262	307.44	327	353	403	468
$\frac{\epsilon_r(t) - \epsilon_s(t)}{\epsilon_r(t)}$ [%]	49.6	50	44	50	47	43	42	40	32	33

3-3-2-8. Modèle de LOUKILI

Dans le cadre d'une thèse de doctorat LOUKILI [7] a entrepris un travail de caractérisation et de compréhension des phénomènes différés dans les bétons à hautes performances BHP et les bétons fibrés à ultra-hautes performances BPR ; l'expression proposée par LOUKILI pour la cinétique de retrait propre est :

$$\varepsilon_r(t) = A \exp. \frac{B}{\sqrt{t} + C} \quad (3-55)$$

avec :

$\varepsilon_r(t)$: le retrait suivant le temps

$$A=525, \quad B=-2.5, \quad C=-0.5$$

$$\varepsilon_r(\infty)=525\mu\text{m/m}$$

3-3-2-9. Autres modèles de retrait

Plusieurs équations permettant de calculer le retrait d'un béton ont été étudiées par ADAM et NEVILLE [35], et peuvent estimer le retrait à long terme à partir des mesures à court terme.

Une méthode pour mesurer le retrait à court terme est décrite dans la norme BS 1881 : partie 5 : 1970[35] cette méthode consiste à faire sécher les éprouvettes de béton pendant une période spécifique dans des conditions données de température et d'humidité. Le retrait obtenu dans ces conditions est à peu près le même que celui obtenu après une longue exposition dans l'air à HR=65%.

D'après [34], le retrait du béton S_b , est une fonction du retrait de la pâte de ciment S_p et la teneur en granulat g dans le béton comme suit :

$$S_b = S_p (1-g)^n \quad (3-56)$$

Les valeurs expérimentales de n varient entre 1.2 et 1.7

Une étude faite par BISSCHOP et al [73,74] sur l'évolution de la micro-fissuration due par le retrait de séchage dans le béton pour les premiers 5 mois de durcissement (à 31°C; 30% HR) Les mesures s'effectuent à l'aide d'une microscopie optique

D'après [75], une discrétisation d'une forme aléatoire de treillis est utilisée par VORONOI pour modéliser le mouvement de l'humidité dans les matériaux cimentaires. La

géométrie du modèle est appelée ‘discrétisation Voronoi’, cette discrétisation peut être utilisée pour estimer le retrait.

D’après [76], une modélisation numérique du retrait propre de la pâte de ciment est étudiée par HYMOSTRUC. Lors de l’hydratation continue d’une pâte de ciment, les pores sont vidés et l’humidité relative est réduite. Cette réduction de l’humidité relative varie avec la réduction de la pression dans l’espace du pore vidé. Le volume du pore d’une pâte de ciment est défini comme le volume initial moins le volume de la matière solide.

Pour la détermination de l’évolution de la microstructure du ciment, d’après [76], HYMOSTRUC a utilisé un programme de simulation numérique ; Ce programme a la capacité de simuler et prédire le développement microscopique structural comme une fonction de la distribution, de la dimension des particules, de volume des pores et de la composition chimique du ciment.

3-3-3. Modèles de prévision de retrait pour béton renforcé de fibres métalliques

3-3-3-1. Modèle de MANGAT et AZARI [4, 36]

Ce modèle théorique prédit le retrait libre des matrices à liant hydraulique renforcé par des fibres d’acier courtes dispersées aléatoirement. Il suppose connaître le retrait de la matrice et s’intéresse à l’effet mécanique des fibres. Le modèle est basé sur une analyse phénoménologique d’un matériau équivalent constitué de fibres alignées et régulièrement dispersées, avec une distance inter-fibre constante

A-Étapes de calcul

1. Détermination de l’espacement entre fibre (s) :

s est déterminée selon l’équation suivante :

$$s^3 + 0.41 l s^2 - B^2 \left(H - 0.41 \frac{l}{2} \right) \frac{l}{L} = 0 \quad (3-57)$$

Avec:

$$L = V_f / (\tau d^2 / 4)$$

d : le diamètre de la fibre

l : la longueur de la fibre

V_f : le volume de fibre incorporé en pourcentage

B : largeur d’éprouvette

H : la hauteur de l’éprouvette

2. Calcul de coefficient de friction à partir de l'équation (μ):

$$\mu = \frac{(\varepsilon_{0s} - \varepsilon_{fs}) \left(0.41 \frac{l}{2} + \frac{s}{2} \right) A \left\{ \left[\frac{\left(\frac{s}{2} \right)^2 + \left(\frac{d}{2} \right)^2}{\left(\frac{s}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} + \nu \right] + \frac{1 - \nu_s}{\left(\frac{E_s}{E} \right)} \right\}}{\pi d \left(0.41 \frac{l}{d} \right)^2 \varepsilon_{0s} \left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2} \right)} \frac{d}{2} \quad (3-58)$$

Où :

ε_{0s} : déformation du retrait de béton témoin

ε_{fs} : déformation du retrait de béton de fibre

A : l'aire de la matrice cylindrique entourant la fibre isolée $A = \pi s^2/4$

E_s : module de Young de l'acier $E_s = 200 \text{ KN/mm}^2$

ν_s : coefficient de Poisson de l'acier $\nu_s = 0.3$

E : module d'élasticité de la matrice.

3. Détermination de la contrainte de lien (τ)

L'expression du retrait exige la connaissance de τ qui dépend de la pression radiale P exercée par le retrait de la matrice et du coefficient de friction μ . Ces deux valeurs sont liées par la relation :

$$\tau = \mu \cdot P \quad (3-59)$$

La valeur de la pression radiale P est calculée suivant la formule :

$$\frac{P}{E} = \frac{\varepsilon_{0s} \left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2} \right)}{\frac{d}{2}} \left\{ \left[\frac{\left(\frac{s}{2} \right)^2 + \left(\frac{d}{2} \right)^2}{\left(\frac{s}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} + \nu \right] + \frac{1 - \nu_s}{\left(\frac{E_s}{E} \right)} \right\}^{-1} \quad (3-60)$$

Avec :

P : la pression radiale exercée par le retrait de la matrice

La dernière étape est le calcul du retrait libre à partir de l'équation (3-61)

4. Dédution de retrait libre (ε_{fs})

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{0s} - \frac{0.3362 \pi d l^2}{s^2 E (0.41 l + s)} \quad (3-61)$$

3-3-3-2. Modèle de HOUARI

L'expression proposée par HOUARI [36] est suggérée par l'existence d'une relation linéaire entre le retrait libre du mortier renforcé de fibres métalliques ϵ_{fs} et le retrait correspondant du mortier témoin ϵ_{0s} .

$$\epsilon_{fs} = \alpha \epsilon_{0s} \quad (3-62)$$

α est la pente de la courbe entre ϵ_{0s} et ϵ_{fs}

En se basant sur le modèle de Mangat et Azari, HOUARI [36] a proposé l'expression suivante de α ,

$$\alpha = 0.847 - 0.0419 \cdot V_f \cdot \frac{l}{d} \quad (3-63)$$

Avec :

V_f : le volume de fibre incorporé en pourcentage

l : la longueur de la fibre

d : le diamètre de la fibre

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_{0s} \cdot (0.847 - 0.0419 \cdot V_f \cdot \frac{l}{d}) \quad (3-64)$$

La formule approchée du retrait libre du mortier renforcé de fibres métalliques ϵ_{fs} sera donc :

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_{0s} \cdot (1 - 0.041 \cdot V_f \cdot \frac{l}{d}) \quad (3-65)$$

3-3-3-3. Modèle de YOUNG et CHERN

D'après [36], et après une légère modification le modèle YOUNG et CHERN peut être considéré comme une extension du modèle BP (Bazant et Pannula) du béton classique. Ces formules sont donc dérivées du modèle BP, en introduisant deux facteurs qui tiennent compte de l'influence de la présence des fibres. Les deux facteurs sont :

- Le volume de fibres incorporé (v)
- L'élanement des fibres (l/d)

Sur cette base Young et Chern proposent une modification de l'équation originale du modèle BP (équation (3-34))

L'équation (3-34) devient :

$$\epsilon_u = 1210 - \Phi \left(V \cdot \frac{l}{d} \right) - 880 y \quad (3-66)$$

Dans laquelle y est définie dans l'équation (3 -35) et Φ est fonction du volume V et de l'élanement l/d . Ces deux facteurs combinés $V \cdot l/d$ sont similaires à la formulation théorique du retrait proposée par Mangat et Azari.

Pratiquement la fonction Φ doit remplir trois conditions :

- L'extension du modèle se réduit au modèle BP si $V=0$
- L'augmentation de V ou l/d donne une augmentation de la fonction Φ , ce qui réduit le retrait ultime.

Sous ces conditions, la fonction Φ proposée par YOUNG et CHERN peut être écrite :

$$\Phi (V \cdot l/d) = \alpha (1 - \exp. (-\beta V l/d)) \quad (3 -67)$$

L'analyse des travaux de MANGAT et AZARI et SWAMY ont permis à Young et Chern de proposer des valeurs de 410 et 0.014 respectivement pour les coefficients α et β L'équation (3 -67) peut s'écrire :

$$\Phi (v \cdot l/d) = 410 (1 - \exp. (-0.014 V \cdot l/d)) \quad (3 -68)$$

3-3-3-4. Le retrait du béton de fibre métallique conservé dans les environnements naturels suivant le modèle ACI209

Nous avons donné dans le deuxième chapitre quelques détails sur une étude faite par Barr et all. [40] concernant l'effet de la composition du béton sur le retrait, les résultats de la déformation du retrait sont modélisés par ACI 209.

Pour la modélisation de ces résultats expérimentaux de retrait, selon [40] plusieurs méthodes ont été proposées, entre autres nous citons :

La méthode MCDONALD et ROPER qui se base sur une expression analytique en fonction du logarithme du temps.

La méthode d'ACI209, qui fait intervenir le coefficient de variation dans l'expression analytique, nous rappelons que le coefficient de variation ω a été déterminé au moyen de l'équation suivante :

$$\omega = \frac{\left[1 / \left[n - 1 \sum_0^n \delta^2 \right] \right]^{1/2}}{1 / 2 \sum_0^n J} \quad (3 -69)$$

Où :

J : est la valeur expérimentale

δ : est la différence entre l'expérimental et la prédiction des valeurs

n : est le nombre d'observations.

Une comparaison entre les valeurs du retrait expérimentales développées dans les éprouvettes prismatiques et cylindriques et les valeurs du modèle ACI est présentée sur la figure (3-6); Les résultats montrent qu'une meilleure corrélation a été obtenue pour les cylindres par rapport aux prismes correspondants.

Nous remarquons aussi qu'une bonne corrélation est obtenue pour les bétons ayant une faible résistance à la compression (au-dessous de 45N/mm²) comme est indiqué sur les figures (b).

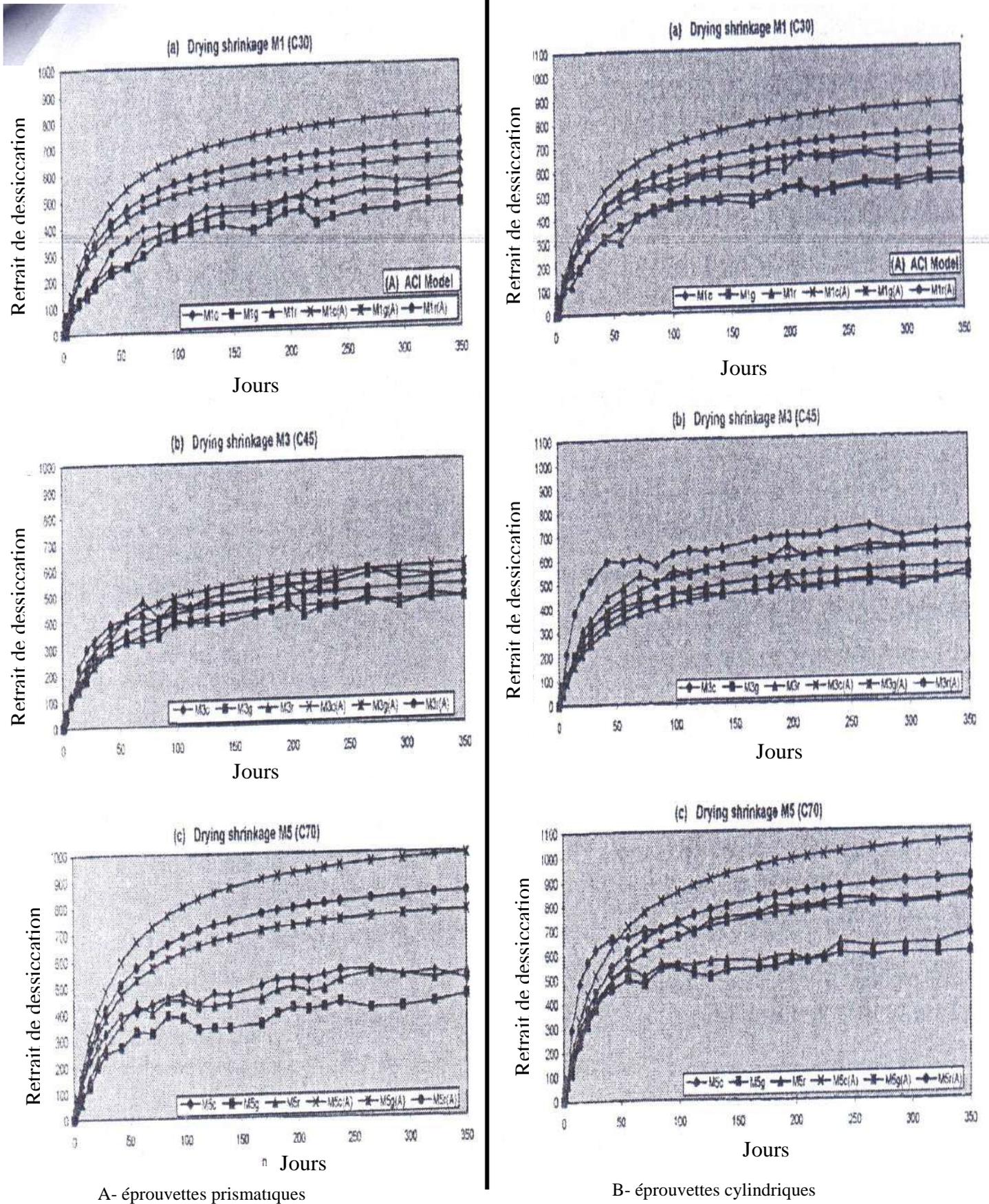


Figure 3-6 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et du modèle ACI [40]

3-4. Modélisation de la fissuration:

3-4-1. Introduction

Les performances des techniques expérimentales actuelles conduisent à cerner en détails micro-structurelles du matériau et leurs conséquences sur le comportement mécanique macroscopique. Les progrès récents de la mécanique des matériaux permettent de modéliser avec finesse les comportements complexes et d'élaborer des stratégies expérimentales d'identification de ses comportements.

Concernant la modélisation de la flexion, ou de la fissuration en flexion des bétons de fibres, nous citons dans ce qui suit, quelques modèles propres aux bétons ordinaux ainsi que ceux renforcés par les fibres.

3-4-2. Modélisation de la fissuration d'un béton

3-4-2 -1. Modèles Empiriques.

Il existe plusieurs modèles empiriques de prévision de flexion et de fissuration des bétons, parmi lesquels on peut citer : modèle de HIMA N.[77], modèle de SWAMY[78], modèle ANDONIAN[55], modèle de BANTHIA et SHENG[79] .

A. Modèle de SWAMY

Une formule empirique est proposée par SWAMY et al. [78], afin de modéliser le comportement de béton de fibre en flexion ; cette formule permet une estimation de la résistance en flexion des BF métalliques.

La relation proposée par SWAMY [78] est la suivante :

$$\sigma_f = 0.97 \sigma_{mf} (1 - V_f) + 3.41 V_f (l/d) \quad (3 -70)$$

Avec:

- σ_{mf} : Contrainte de flexion de la matrice
- σ_f : Contrainte de flexion des BF

Les résultats de SWAMY sont illustrés par les courbes de la figure 3-7 ci-dessous

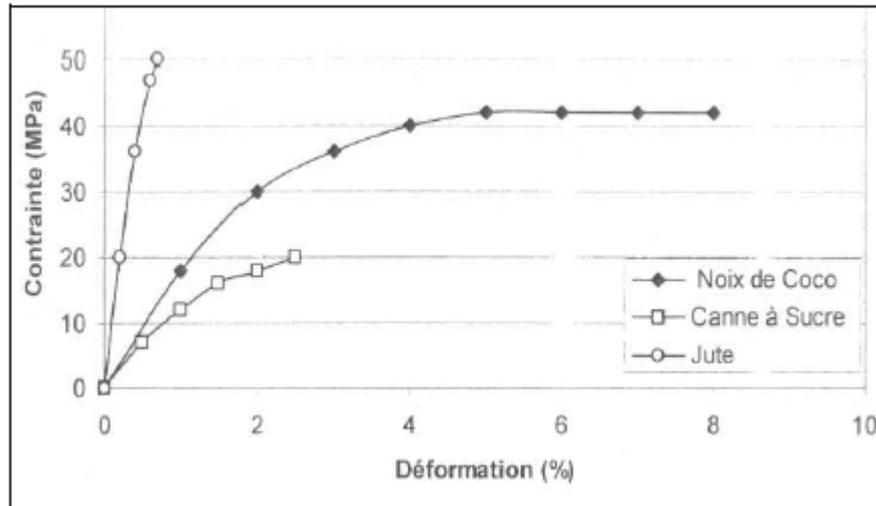


Figure 3-7: Courbes contrainte-déformation des bétons de fibres végétales [78]

B . Modèle ANDONIAN

ANDONIAN et al. [55], proposent une relation (3-71) qui simule le comportement en flexion du BF de cellulose.

$$\sigma_f = (\alpha' / \beta') \sigma_{mf} (1-V_0)(1-V_f) + 2\eta \alpha' \cdot (l/d) \cdot V_f \quad (3-71)$$

Avec:

- σ_{mf} : Contrainte de flexion de la matrice
- $\alpha' = \sigma_{mf} / \sigma_{ft}$
- $\beta' = \sigma_{mf} / \sigma_{mt}$
- V_0 : volume de la matrice
- V_f : volume des fibres

Dans le même contexte, ANDONIAN et al. [55], présentent une relation (2-15) qui permet de calculer le module d'élasticité en traction (E_{mt}) ou en flexion (E_{mf}) des BF de cellulose.

$$E_{mt} = E_{mf} = E_m (1-V_0)(1-V_f) + \eta E_f V_f \quad (3-72)$$

Avec:

- E_m et E_f : Respectivement, modules d'élasticité de la matrice et de la fibre.
- η : Coefficient de rendement des fibres

Les résultats de l'évaluation de module d'élasticité en flexion ou traction des bétons de fibre donnée par ANDONIAN et al. [55], sont illustrés par la figure3-8

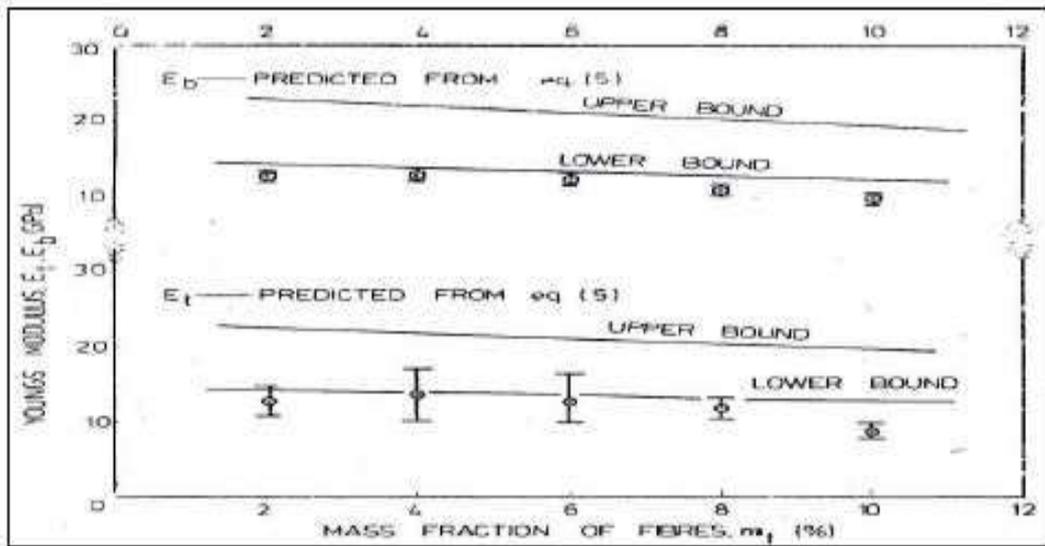


Figure 3-8: Module d'élasticité évalué par ANDONIAN [55]

C. Modèle de BANTHIA et SHENG

BANTHIA et SHENG [79] proposent un modèle qui simule l'ouverture de fissuration en flexion des bétons de fibre d'acier, de carbone et de polypropylène ; ils ont utilisés des éprouvettes de dimensions 25x25x200mm³, soumis à un effort de flexion quatre points (Figure3-9) ; Tous les courbes ont une même allure proposée par Banthia et Sheng (figure 3-10)

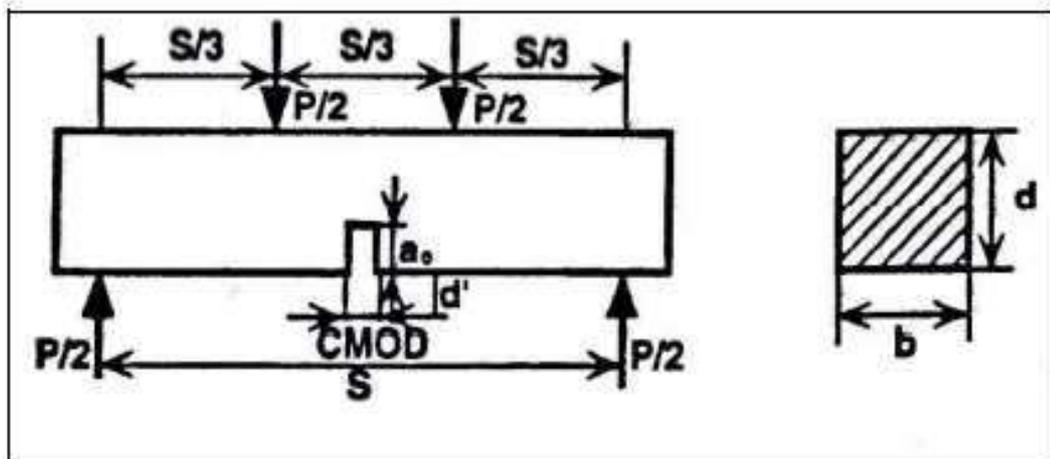


Figure 3-9: Dispositif de flexion de Banthia et Sheng [79]

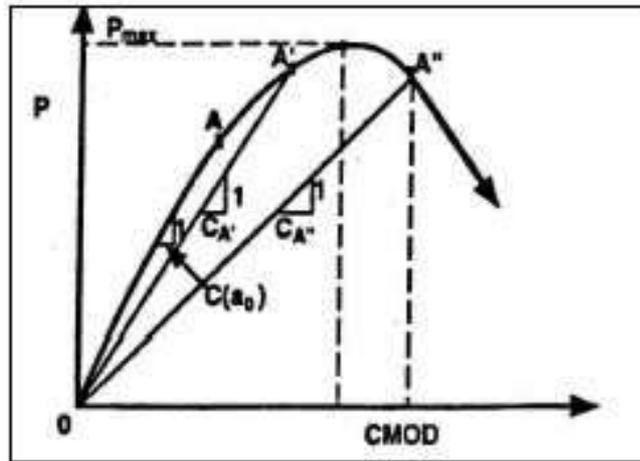
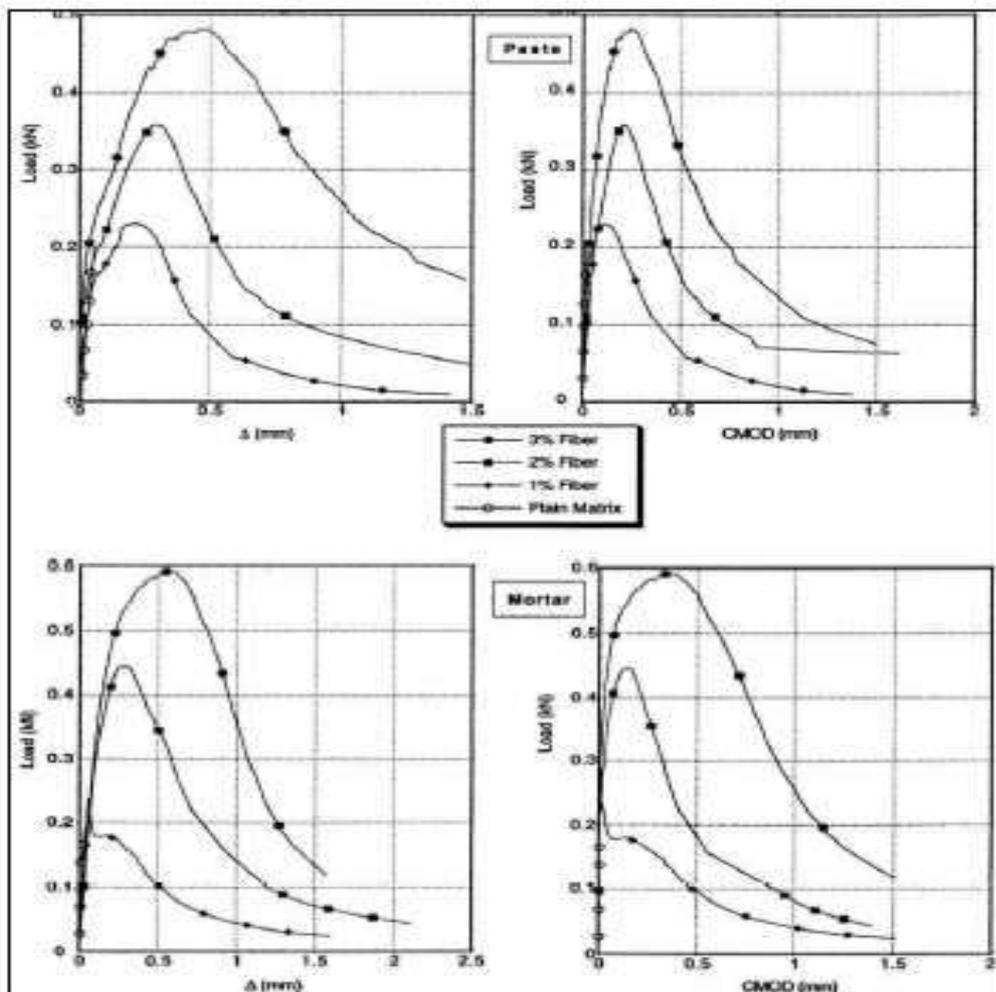


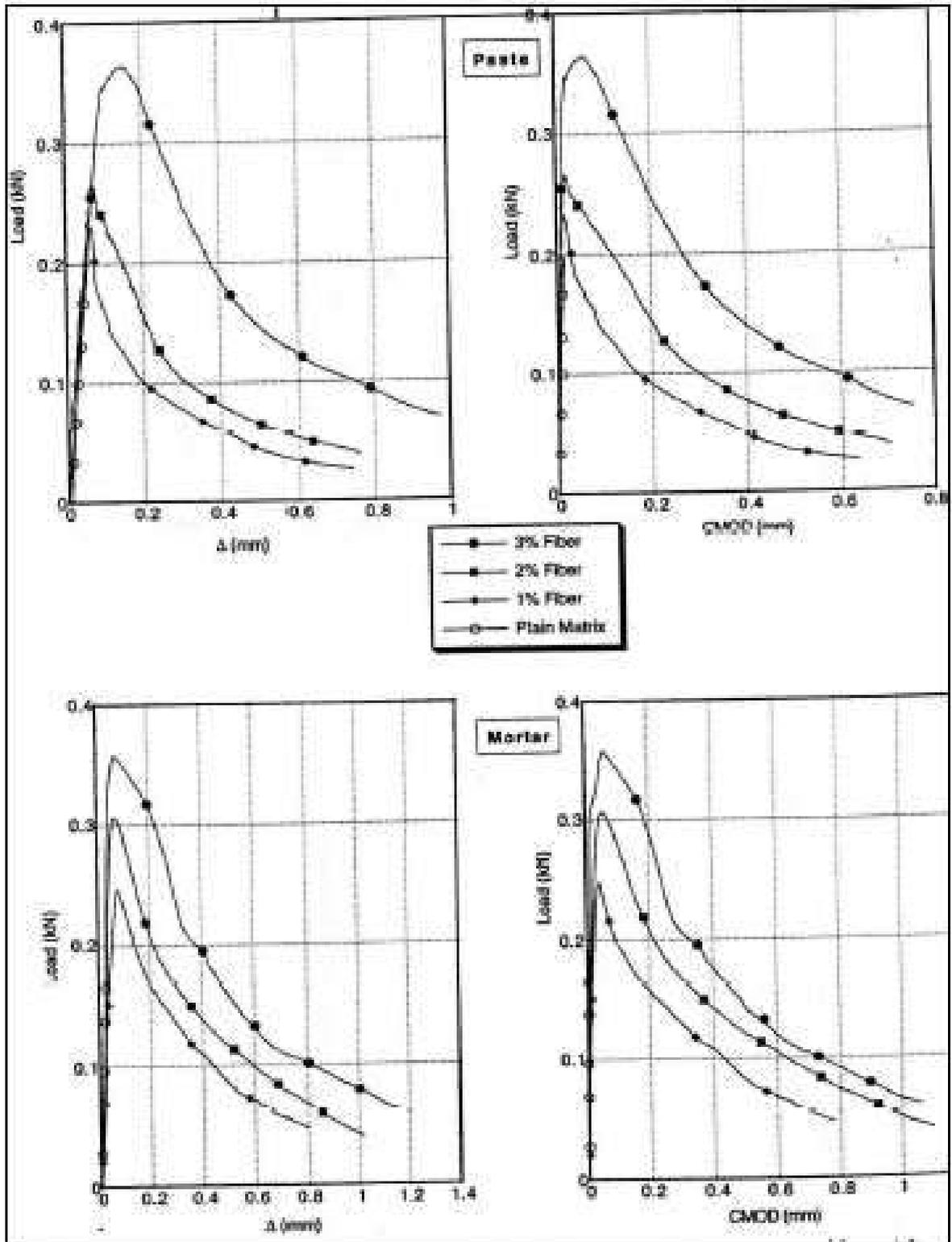
Figure 3-10:l'ouverture de fissure en fonction de chargement [79]

L'ensemble des résultats obtenus par Banthia et Sheng[79] pour les différents types de fibres(Carbone, acier, polypropylène) sont schématisés dans les figures (3-11) du 1 à 3 ci-dessous.

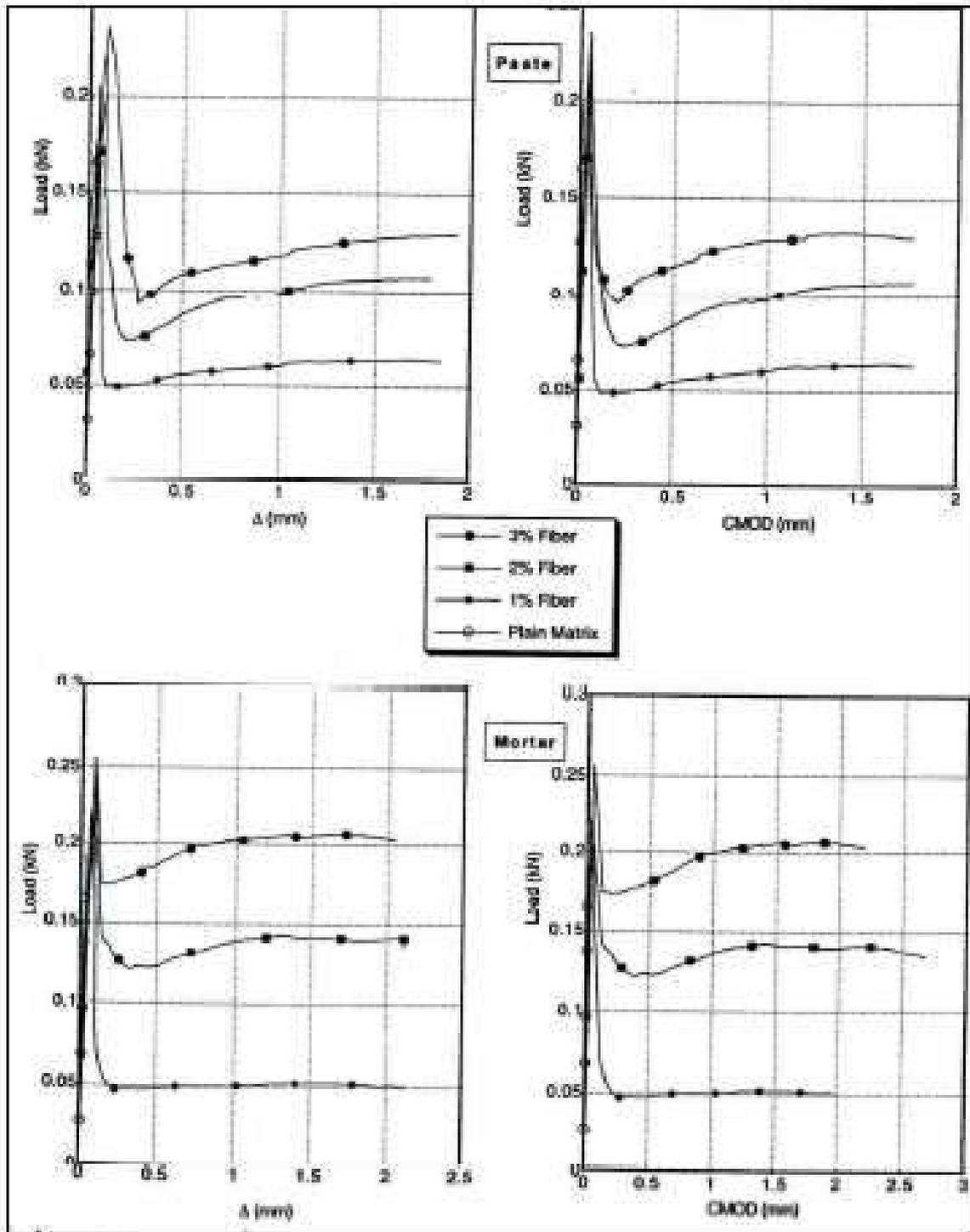
Il est clair que l'allure de toutes ses courbes est le même.



1- Fibres de carbone



2- Fibres d'acier



3- Fibres de polypropylène

Figure 3-11 : Estimation d'ouverture de fissuration CMOD donnée par Banthia et Sheng [79]

3-4-2 -2. Modèles Numérique:

Les modèles numériques sont des modèles qui se basent sur des méthodes numériques comme la méthode des éléments finis, et la méthode de différence finie [80-81].

Selon Liu et Quek [81], la méthode des éléments finis est une approche numérique largement utilisée pour résoudre des problèmes structurels.

L'exploitation de la méthode des éléments finis MEF est de plus en plus utilisée, en raison de l'évolution des connaissances et de la capacité des logiciels et du matériel informatique [82].

De nombreux programmes informatiques sont disponibles pour configurer et analyser un modèle en MEF, il n'y a pas tellement capable d'exécuter des analyses itératives non linéaires et de prédire le comportement du mode fissure et défaillance de manière appropriée ; des divers logiciels d'analyse par éléments finis polyvalents comme : ABAQUS, ANSYS, STRAND7, MSC.NASTRAN et ATENA semblent être populaires pour ces types d'analyses dans le cas des matériaux cimentaires.

Dans la littérature, on trouve de nombreuses études pour prédire numériquement la fissuration en flexion du béton [81-91]

A. Modèle de MAZARS

MAZARS[86] a présenté une modélisation numérique par la méthode des éléments finis des poutres soumises à un chargement de flexion quatre points.

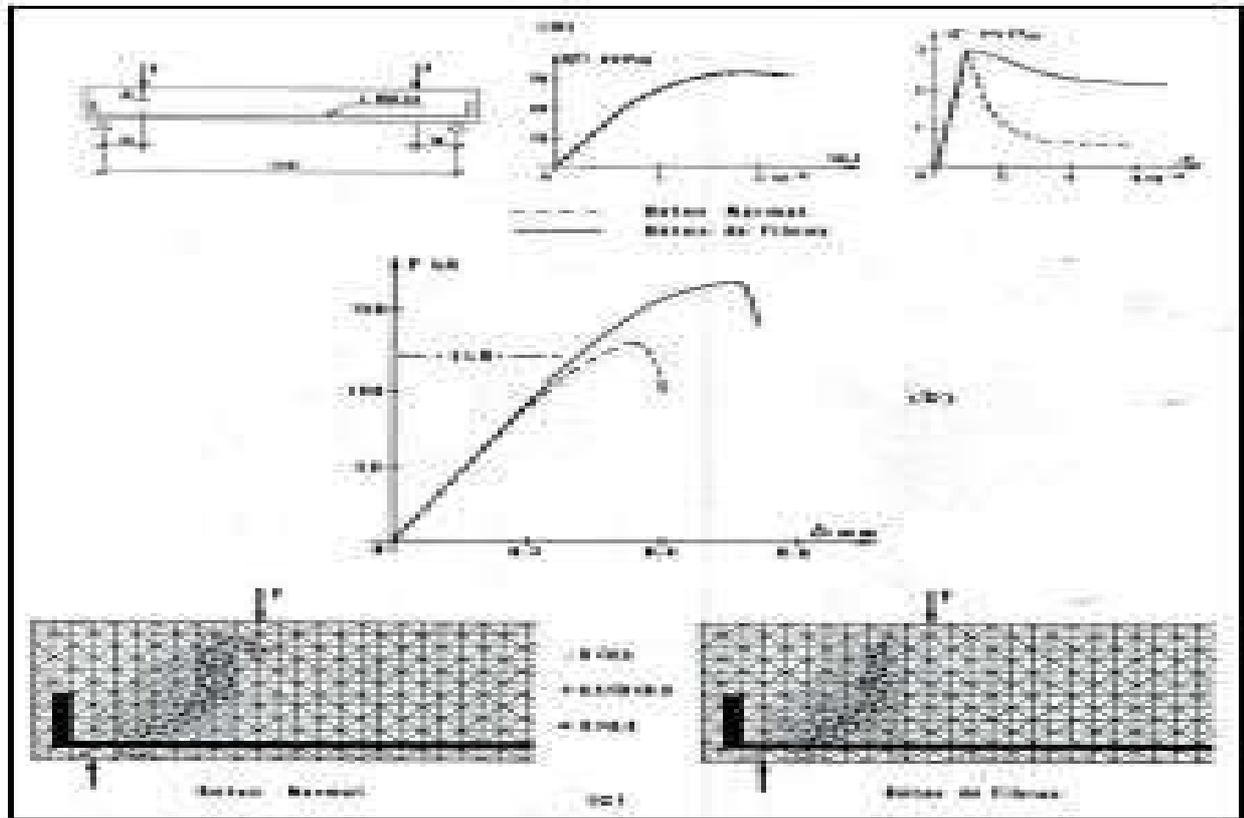


Figure 3-12: modèle de MAZARS [86]

L'ensemble des résultats du MAZARS sur la modélisation sont données par la figure 3-12 ci-dessus

B. Modèle de FREDERIC - DUFOUR[87]

Dans le cadre d'une mémoire d'habilitation à diriger des recherches FREDERIC - DUFOUR [87] a entrepris un travail de contributions a la modélisation numérique de la fissuration des structures en béton, il a utilisé un modèle capable de représenter une fissure à partir d'un calcul aux éléments finis, appliquée sur une poutre en flexion quatre points excentrée (Figure 3-13).

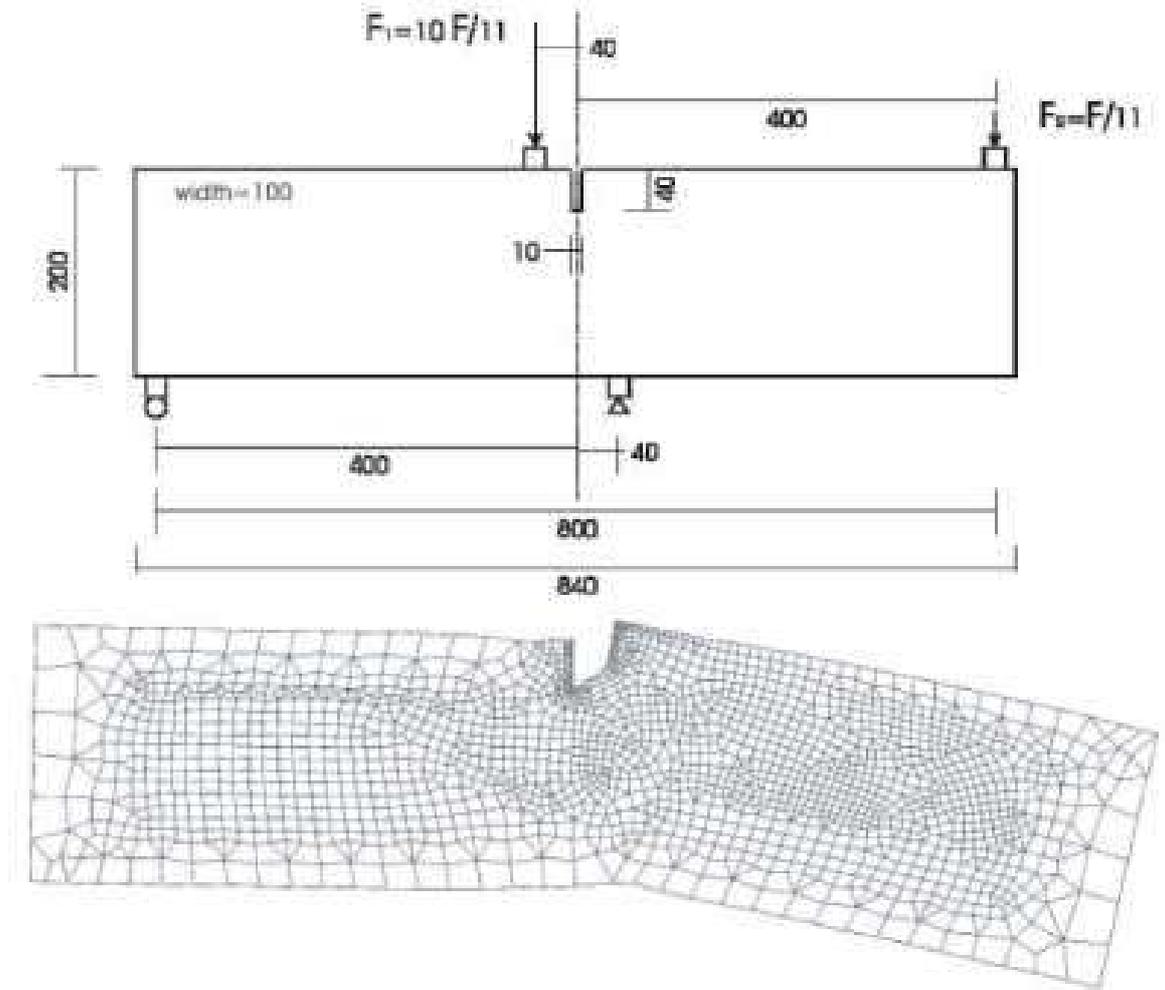


Figure 3-13 : géométrie et maillage de la simulation d'une poutre en flexion quatre points excentrés [87]

3-5. Description d'ANSYS :

ANSYS (Analysis system) [80,83] a été développé par Dr. John Swanson, fondateur de la société ANSYS Inc. qui a son siège à Houston, USA. La méthode utilisée est celle des éléments finis. Il est utilisé dans des domaines allant de l'automobile et l'électronique à l'aérospatiale et la chimie. L'ANSYS permet la modélisation des structures, produits, composants ou systèmes et d'étudier leurs réponses physiques telles que les niveaux de contraintes, les distributions de température ou l'effet de champs électromagnétiques...

Tous les programmes d'ANSYS passent par trois étapes de base qui sont [83,91]:

I- Prétraitement (Preprocessing):

- Sélection du type d'élément.
- Propriétés des matériaux.
- Modélisation et maillage de la géométrie.
- Application des limites et conditions de charge.

II- Résolution (Solving):

- Soumettre le modèle au résolveur ANSYS

III- Traitement des messages (Post processing):

- Vérification et évaluation des résultats
- Présentation des résultats - Traçage des courbes.

Dans ce qui suit, on donnera en bref les différentes tâches et entrées utilisées pour créer un modèle par ANSYS.

3-5-1. Etapes de la modélisation de flexion par ANSYS

Comme c'est indiqué dans le paragraphe ci-dessus ; il y a plusieurs tâches successives qu'il faut les compléter correctement pour que le modèle s'exécute correctement aussi, ces étapes sont les suivantes :

- Choix des éléments et définition leur propriétés ;
- Création du modèle physique par dessin graphique ;
- Discrétisation du modèle en éléments finis ;
- Définir les conditions aux limites;
- Analyse et résolution de problème par:
 - Application d'un incrément de charge (Δf)
 - Entamer à la procédure itérative (Newton Raphson par exemple)
 - Analyse par la méthode des éléments finis
 - Évaluer le vecteur de contraintes résiduelles σ_0 , et le vecteur des forces résiduelles f_0
 - Calculer la norme du vecteur de force résiduelle f_0

Dans ce qui suit, nous donnons les instructions de calcul utilisées en détails et par ordre, ce qui contribuera à une meilleure compréhension en cas d'une éventuelle utilisation futur.

A. Choix de type d'élément

Le choix des éléments types à partir de la bibliothèque d'ANSYS s'effectuer par :

-Main menu> Preprocessor > Element Type > Add/Edit/delete

Lors d'utilisation de cet instruction; l'apparition d'écran est schématisé dans la figure 3-14

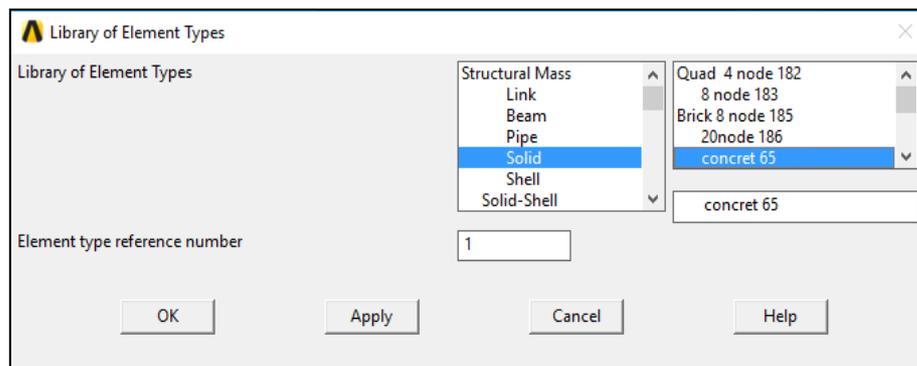


Figure 3-14 : choix de type d'élément

La bibliothèque d'ANSYS offre plus de 150 éléments types des matériaux à usage dans différent domaines d'ingénierie.

La sélection des types d'éléments appropriés est un critère important dans l'analyse des éléments finis. Dans notre étude, Solid65 a été utilisé comme élément type pour modéliser le béton classique et renforcé.

Les éléments (SOLID65) sont des éléments tridimensionnels [93] utilisés pour modéliser des problèmes de béton armé ou des matériaux composites renforcés par les fibres. L'élément solide a huit nœuds avec trois degrés de liberté par nœud : Des translations dans les directions nodales x , y et z , L'élément est capable de déformation plastique et de fissuration dans trois directions orthogonales.

L'élément Solid65 permet la présence de trois matériaux de renforcement différents et indépendants. La figure 3-15 montre plus des détails de SOLID65.

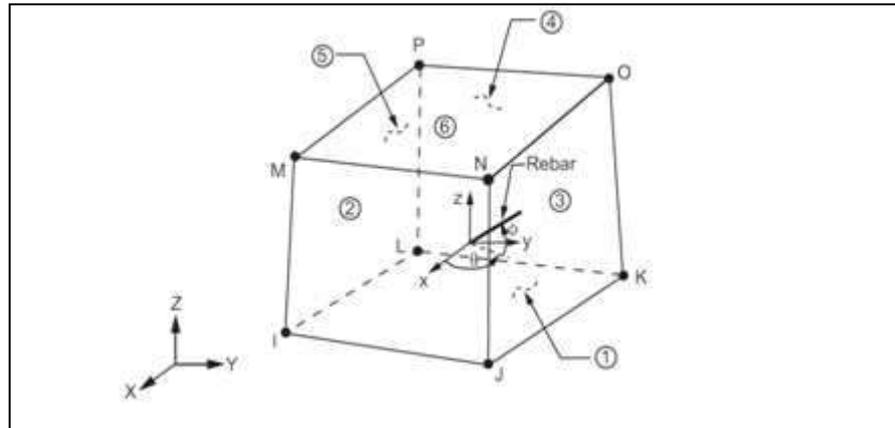


Figure 3-15 : L'Elément SOLID65 [93]

L'élément Solid65 comporte une analogie de fissure pour le craquage dans les zones de tension et un algorithme de plasticité pour tenir compte du concassage du béton dans les zones de compression.

Il s'agit d'un élément iso-paramétrique, solide à huit nœuds avec les points d'intégration pour les contrôles de craquage et de concassage. Le comportement élastique linéaire régit les analyses jusqu'à ce qu'elles dépassent les forces de traction ou de compression spécifiées. Une fois que les contraintes principales aux points d'intégration atteignent la résistance à la traction ou à la compression, le craquage ou le concassage des éléments en béton peut être formée. Ensuite, les régions fissurées ou écrasées se formeront en perpendiculaire aux contraintes résiduelles localement redistribuées à la direction de la contrainte principale. Ceux-ci nécessitent la solution itérative non linéaire avec ordinateur haute performance

Le renfort fourni par les fibres est simulé par des éléments de barre répartie uniformément dans l'élément (Figure 3-16)

.Pour la fissuration, le *smeared crack model* (répartition des fissures à travers l'élément) est utilisé.

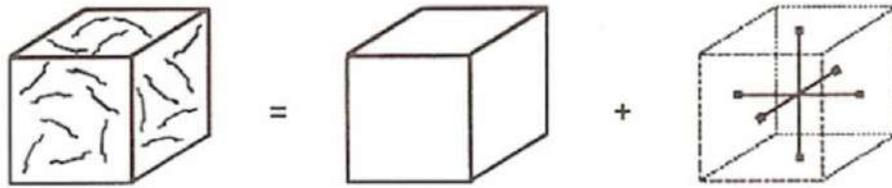


Figure 3-16. Modélisation du béton de fibres dans ANSYS. [39]

B. Les constantes réelles (Real Constants) :

Les constantes réelles sont déterminées à partir de la bibliothèque d'ANSYS par le cheminement suivant :

Main menu > Preprocessor > Real constant > Add/Edit/delete

Dans cette phase, on peut introduire la distribution des fibres par leurs angles d'orientations θ et φ comme est indiqué dans la figure 3-17

The image shows a dialog box titled "Real Constant Set Number 1, for SOLID65". It contains the following fields:

- Element Type Reference No. 1
- Real Constant Set No. (input field)
- Real constants for rebar 1:
 - Material number: MAT1 (input field)
 - Volume ratio: VR1 (input field)
 - Orientation angle: THETA1 (input field)
 - Orientation angle: PHI1 (input field)
- Real constants for rebar 2:
 - Material number: MAT2 (input field)
 - Volume ratio: VR2 (input field)
 - Orientation angle: THETA2 (input field)
 - Orientation angle: PHI2 (input field)
- Real constants for rebar 3:
 - Material number: MAT3 (input field)
 - Volume ratio: VR3 (input field)
 - Orientation angle: THETA3 (input field)
 - Orientation angle: PHI3 (input field)
- Crushed stiffness factor: CSTIF (input field)

Buttons at the bottom: OK, Apply, Cancel, Help.

Figure 3-17: Fenêtre d'éditeur des constantes réelles de solide 65

C. Propriétés des matériaux (Material Properties) :

Pour caractériser les différents matériaux utilisés, on suit les instructions suivantes :

- Main menu > Preprocessor > Material Props > Material Models

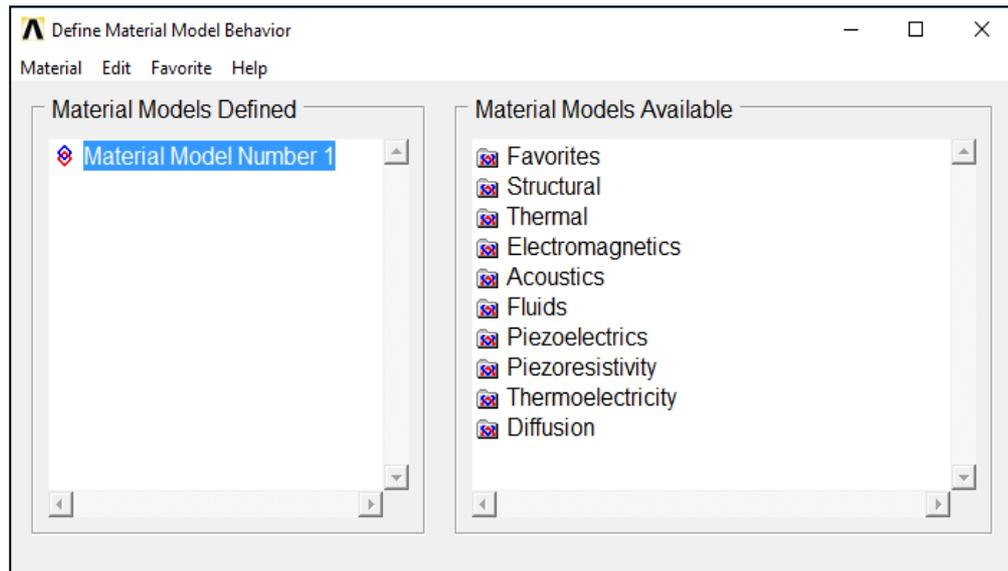


Figure 3-18: Fenêtre de choix de matériau

Dans cette étape on introduit tous les paramètres linéaires des matériaux comme module d'élasticité, coefficient de Poisson, coefficient de dilatation thermique; ces paramètres nous permettent de caractériser les différents matériaux (béton, renfort....), dans cette étape la fenêtre apparaît comme ci-dessous (Figure 3-19).

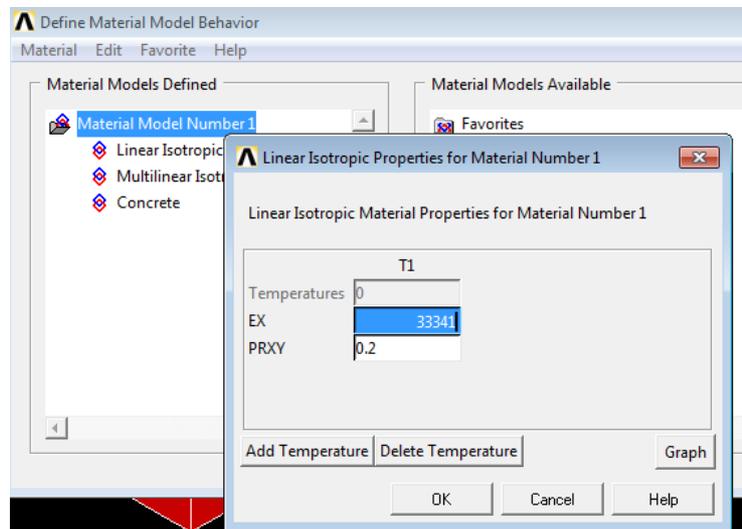


Figure 3-19 : Fenêtre d'éditeur des propriétés élastiques du matériau

Ajoutons qu'il faut donner même l'allure de la courbe (contrainte –déformation) de béton comme été schématisé par la figure 3-20.

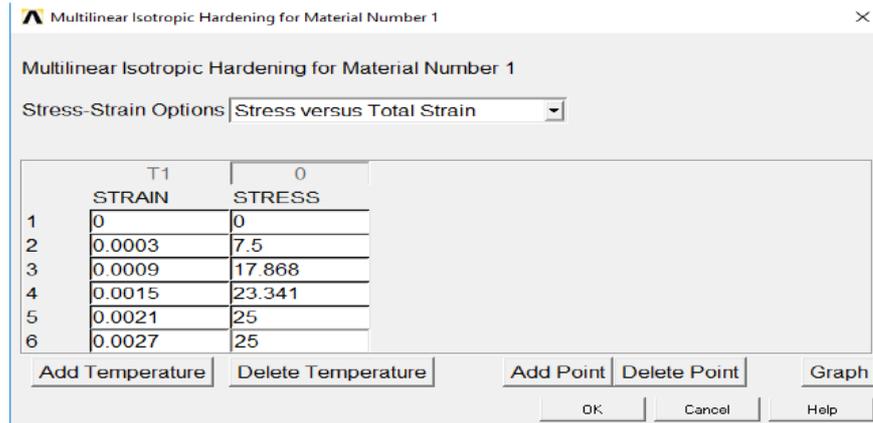


Figure 3-20 : les coordonnées des courbe contrainte déformation du béton

D. Modélisation (*Modeling*) :

Il est noté qu'il existe dans l'ANSYS différente méthode pour la création d'une forme géométrique

La création de la forme géométrique d'un élément -volumiques prismatique par exemple s'effectuer par l'introduction des instructions:

- Main menu>Preprocessor > Modeling > Create> Volume>Block> By Dimensions

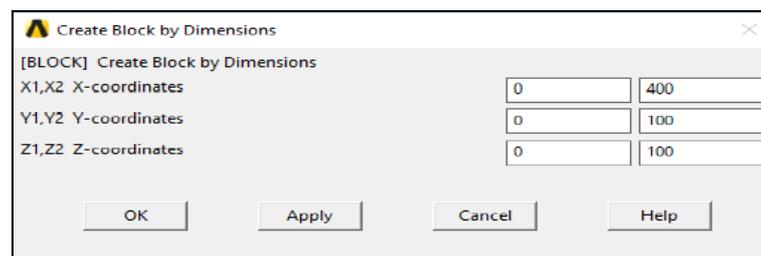


Figure 3-21 : Les coordonnées de modèle

E. Discrétisation en éléments finis (*Meshing*):

La discrétisation en éléments finis s'effectuer par l'instruction:

Main menu>Preprocessor > Meshing > Mesh Tools

F. Appuis et Chargements:

Pour définir les appuis, on utilise les instructions suivantes :

Main menu>Solution> Define loads > Apply > Structural>Displacements> On nodes

Le chargement s'effectuer par:

Main menu>Solution> Define loads > Apply > Structural>force/moment> On nodes

G. Type d'analyse

Après la création du modèle, l'étape suivante est l'analyse des résultats avant l'affichage

Les instructions au-dessous permet de donner l'ordre d'entamer à l'analyse ;

- Main menu>solution > analysis type > solution control

H. Affichage des résultats

La dernière étape est L'affichage des résultats par Le programme ANSYS, cette étape est effectuée par l'instruction suivante:

Main Menu>Solution> General Postproc > Plot Results >Contour Plot

3-6. Conclusion:

La modélisation est l'un des outils les plus importants qui permet l'analyse des phénomènes pour une meilleure connaissance scientifique.

D'après la recherche bibliographique étudiant la modélisation du retrait et fissuration des bétons et mortiers, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Pour le retrait:

- Il existe plusieurs modèles relatifs au retrait plastique du béton à l'état frais (théorie de KEDJOUR, approche de TDC....).
- Parmi ces modèles il y a ceux qui se basent sur une discrétisation de l'élément telle que la discrétisation de VORONOI, et d'autres qui nécessitent le calcul des coefficients ou facteurs pour chaque position, ces modèles sont très compliqués.
- le modèle BP regroupe plusieurs paramètres influençant sur le retrait du béton, une légère modification de ce modèle est développée par YOUNG et CHERN pour la prédiction du retrait de béton renforcé par les fibres métalliques.
- le modèle de MANGAT et AZARIE exige beaucoup de calcul qui demande en premier lieu la détermination de l'espacement entre les fibres, et par la suite, le retrait est une fonction de la contrainte inter-faciale et de la pression latérale.

A notre avis, le modèle YOUNG et CHERN est plus applicable que le modèle de MANGAT et AZARIE car il tient compte de la composition du béton et de l'endroit de l'essai et il ne demande pas la connaissance du retrait du béton témoin pour avoir le retrait du béton renforcé.

Pour la fissuration :

Plusieurs remarques s'imposent, il apparaît tout d'abord que la plupart des modèles sont des modèles mathématiques, basant sur des formules empiriques tels que : le modèle de SWAMY, modèle ANDONIAN, modèle de BANTHIA et SHENG..., d'autres modèles sont numériques basant sur la méthode des éléments fins telle que modèle de MAZARS, et modèle de FREDERIC - DUFOUR.

L'insuffisance des modèles pour la prédiction du comportement du retrait et de la fissuration en flexion du béton renforcé par les fibres végétales notamment les fibres de palmier dattier, est très remarquée.

Pour des raisons pratiques et pour la modélisation des bétons et mortiers de fibres de palmier dattier, notre choix portera sur les modèles suivants:

- L'expression de HOUARI ainsi que le modèle YOUNG et CHERN, suivie par une programmation par MATLAB, pour la prédiction du retrait, bien sûr après certaines modifications nécessaires des expressions de base, afin d'adapter au béton de fibre de palmier dattier.

- Pour la modélisation de fissuration en flexion, on utilisera l'ANSYS: un programme qui offre une solution complète aux problèmes structurels,

En effet, ces modèles répondent bien aux données expérimentales disponibles pour notre béton de fibre végétale, que nous allons développer dans les chapitres qui suivent.

Etude de retrait et de fissuration des bétons de fibres de palmier dattier

4-1. Introduction :

Dans ce chapitre nous exposerons les caractéristiques des différents matériaux (sable, ciment, gravier et fibres) entrant dans la composition du béton classique et fibré à savoir : la granulométrie, la composition chimique, la masse volumique, la propreté et autres propriétés physiques,..... Afin d'adopter des compositions normalisées.

Nous allons donner aussi les résultats expérimentaux des différents essais mécaniques et des déformations, dans le but de modéliser ces résultats dans chapitre qui suit.

Les essais expérimentaux ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire pédagogique de département de Génie Civil et d'hydraulique d'université d'Ouargla.
- Laboratoire de recherche « *Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelle en Zones Aride* » - université d'Ouargla.
- Laboratoire Travaux Publics Sud (LTPS).

4-2. Caractérisation des matériaux:

La connaissance des propriétés des bétons est liée directement aux constituants de base, à la formulation du matériau et, à la pratique de mise en œuvre. Pour cela nous allons aborder, au premier lieu les caractéristiques des matériaux utilisés dans les différents types du béton, à savoir les granulats, le ciment, l'eau et les fibres.

4-2-1. Propriétés des granulats

Les granulats utilisés sont des matériaux disponibles en quantité suffisante dans notre région; leurs propriétés sont illustrées sur le tableau 4-1 ci-dessous.

Les essais fondamentaux pour la caractérisation des granulats sont: l'analyse granulométrique, l'équivalent de sable, la masse volumique apparente et absolue, la propreté, la dureté, et le taux d'absorption; Ces essais expérimentaux ont fait l'objet d'une synthèse des travaux de Master des étudiants suivants: TAHRI F et RAMEL S; BAISSA M et BOUROUBA S; GOUDJIL S, ABADLI A, et MAHBOUB H, BEN ESSADIK A et DAREM O. qui sont réalisés sous notre direction.

Tableau 4-1 : Propriétés des granulats utilisés

Propriétés	Norme et référence	Type de granulat	
		Sable	Gravier
Nature	-	Naturel	Concassé
Provenance	-	Chamss Ouargla	Benbrahim H-Messaoud
Classe	NF P 18-301 ref. [95] NF P 18-101 ref [96]	0/5	3/8 - 8/15 – 15/25
D max (mm)	-	5	25
Mf	-	2.8	--
ES (%)	NFP 18-598 ref [97]	89.5 Après lavage	--
Masse volumique apparente. (Kg/m ³)	NFP 18-555 [98]	1540	3/8 : 1320 8/15 : 1370 15/25 : 1410
Masse volumique absolue. (Kg/m ³)	NFP 18-555 [98]	2600	3/8 : 2650 8/15 : 2610 15/25 : 2630
Analyse granulométrique	NFP 18-560 [99]	Tableau 01 Annexe	Figure01 et 02(A,B,C) Annexe
Propreté %	NF P 18-591 [100]	0.85	3/8 : 1.54 8/15 : 0.43 15/25 : 0.25
Taux d'absorption%	NFP18-555 [98]	0.63	3/8 : 1.98 8/15 : 1.91 15/25 : 1.78
Dureté LA	NF P 18-573 [101]	----	28
Micro Deval	NF P 18-572 [102]	----	34%
Bleu De Méthylène VBS	NF P 94-068 [103]	Avant lavage : 6.52 Après lavage : 0.58	

Commençant par le sable; L'analyse granulométrique de ce dernier nous a permis de déterminer la valeur du module de finesse du sable, où nous remarquons qu'avec un module de finesse $M_f = 2.8$; et suivant la référence de la classification recommandée par les normes, il s'agit d'un sable préférentiel avec une granulométrie étalée et qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons et mortiers ordinaires.

Avant le lavage d'échantillon de sable, L'équivalent de sable est de l'ordre de $ES = 54.5\%$, ce résultat est corrigé avec le lavage, la nouvelle valeur comme indique le tableau 4-1 est $ES = 89.5\%$, résultat indique qu'il s'agit d'un sable très propre ; D'où nous pouvons conclure qu'il y a une absence presque totale de fines argileuses, ce qui nécessite l'utilisation d'un adjuvant ou l'augmentation du volume d'eau de gâchage.

D'après le tableau 4-1 ; le coefficient d'absorption de notre sable est $TA = 0,63\%$, et pour les différentes classes du gravier n'exède pas un taux 2%. Donc les grains de sable utilisés ont une capacité d'absorption assez faible par rapport les grains de gravier ; mais nous remarquons que tous les types restent dans la limite recommandée par les normes NF P 18-555 ; qui égale à 2.5%.

L'essai de la propreté superficielle des granulats montre qu'il s'agit des granulats propres car, le sable et toutes les fractions du gravier ont des degrés de propreté inférieurs à 2% - valeur limitée par la norme NF P 18-591 [100].

L'analyse chimique des granulats (sable et gravier) est effectuée au sein du laboratoire LTPS; les résultats d'essais sont illustrés dans le tableau 4-2 ci-dessous

Tableau 4.2 : Résultats d'analyse chimique pour le sable et le gravier

Les essais	Sable 0/5	Gravier 15/25	Recommandation selon la norme XP P 18-540	
Taux des Insolubles en %	96.48	37.7	-	-
Taux des Sulfates SO_3^{2-} %	0.07	0.21	Inférieur à 0.43	conforme
SO_4^{2-} %	0.09	0.26	-	-
CaSO ₄ , 2H ₂ O	0.40	1.17	-	-
Taux des Carbonates CaCO ₃ %	0	57	-	-
Taux des Chlorures Cl ⁻ %	0.007	0.022	Inférieur à 0.06	conforme
NaCl %	0.012	0.037	-	-

À la lumière des essais cités au-dessus; nous pouvons dire que les granulats sont acceptables.

L'ensemble des photos au cours d'effectuer des essais sont regroupées en annexe: les figures du 01 à 11

4-2-2. Propriétés de ciment

Le ciment utilisé pour la confection des bétons est un ciment Portland composé CPJ-CEM II /A 42,5 R fabriqué par l'usine d'AIN TOUTA

Selon la fiche technique, l'analyse chimique et les propriétés de ce ciment sont données par les tableaux 4-3 et 4-4

D'après ces deux tableaux, nous distinguons que le ciment utilisé a une densité spécifique inférieure à la moyenne habituelle pour les ciments (2.9), une finesse acceptable et une prise satisfaisante à la spécification des ciments courants.

Tableau 4-3: Analyses chimiques de ciment.

Perte au feu (%)	8,00 - 10,00
Résidus insolubles (%)	0,7 - 1,5
Teneur en sulfates SO ₃ (%)	2,10 - 2,50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,00 - 1,30
Teneur en chlorures (%)	0,01 - 0,03
Composition minéralogique du clinker	
Silicates tri-calciques C ₃ S (%)	55,00 - 62,00
Silicates bi-calciques C ₂ S (%)	13,00 - 22,00
Aluminates tri-calciques C ₃ A (%)	6,50 - 8,20
Alumino-ferrites tétra-calciques C ₄ AF (%)	10,00 - 13,00

Tableau 4-4: Propriétés physiques et mécaniques du ciment

Propriété	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	Début de prise (heur/min)	Fin de prise (heur/min)	Résistance minimale à la compression à 28j (MPa)
CPJ-CEMII/A	1.2	3,02	3000 et 3200	2 / 45	3/50	42.5

4-2-3. Propriétés d'eau de gâchage

L'eau joue deux fonctions principales dans le mélange de béton ; l'un est l'hydratation du ciment et l'autre est d'assurer une bonne maniabilité à l'état frais.

L'eau de gâchage utilisée est une eau potable de robinet.

L'analyse chimique de l'eau a été effectuée au laboratoire traitement des eaux de l'université d'Ouargla, les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4-5 : Composition chimique de l'eau en mg/l.

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	pH	salinité
242	125	31	536	755	14.5	755	124	7.75	2799

Nous remarquons que l'eau à une faible salinité et ne contient pas d'éléments nocifs en pourcentage important [105].

4-2-3. Propriétés des fibres

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres " Dokar " de palmier dattier de la région d'Ouargla, avant les introduire dans la formulation du béton, nous avons réalisé les étapes préliminaires suivantes :

- Dans un bain d'eau, nous avons effectué une séparation en fibres individuelles les plaquettes des fibres de palmier dattier, pour faciliter leur défibrage.
- La deuxième étape est le lavage des fibres individuelles dans un mélange d'eau et quelques gouttes de l'eau de javel, afin d'éliminer les impuretés et la couche de lignine qui entoure les fibres.
- La dernière étape est la coupure des fibres selon les longueurs désirées (60 mm pour notre travail).

L'ensemble des étapes de préparation des fibres sont données en figure 12/ Annexe

Suivant les études de KRIKER [4] L'analyse minéralogique de la poudre des mêmes fibres après calcination à 400 °C est résumée dans le tableau 4-6

Tableau 4-6: Analyse minéralogique de la poudre des fibres de Dokar calcinées à 400 °C [16]

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PAF
%	48.04	6.12	2.51	0.05	4.88	14.22	1.81	2.80	0.42	0.45	18.08

Il est remarquable que les fibres utilisées contiennent un taux élevé de la SiO₂ et de CaO.

Concernant les propriétés physiques et mécaniques (figure13/annexe), le tableau 4-7 donne les principales caractéristiques des fibres de palmier dattier de notre région.

Tableau 4-7 : Les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Pa =512.21 -1088.81
Masse volumique absolue (kg/m ³)	Ps = 1300 -1450
Résistance à la traction (MPa)	240±30
Déformation à la rupture	ε = 0.232)
Taux d'humidité (%)	W =9.5 -10.5
Taux d'absorption(%)	TA = 96.83 -202.64
Diamètre (mm)	d = 0.1 - 1 (d moy=0.45)

4-3. Composition de béton classique et de fibre

Après la caractérisation des constituants de base, entrant dans la composition des bétons, nous passons à la détermination de leurs dosages, pour obtenir à la fin, un béton ayant des caractéristiques physiques, mécaniques et rhéologiques assez acceptables.

4-3-1. Composition du béton Classique

Dans cette partie de la recherche, nous allons mener une étude expérimentale de la formulation de béton selon la méthode de DREUX-GORISSE [104], rappelons qu'il existe plusieurs méthodes pour composer un béton, tels que BOLOMEY, FAURY, VALLETTE, DREUX-GORISSE, SCRAMTAIEV... etc,

La formulation de la méthode DREUX-GORISSE est résumée de la manière suivante :

1. Le dosage en ciment et en eau à partir de la formule de BOLOMEY.
2. Les proportions volumétriques des classes granulaires à partir de la courbe granulométrique.
3. Les proportions pondérales des constituants pour un mètre cube du béton.
4. Consistance plastique : Un affaissement au cône d'Abrams d'environ 5 à 9 cm.
5. Résistance : une résistance nominale à la compression à 28 jours σ_{28} égale à 25 MPa.

D'après l'application de la formulation de béton selon la méthode de DREUX-GORISSE [104] ; nous déduisons les pourcentages successifs des différents agrégats :

- ✓ Pourcentage de sable corrigé SC= 33% ;
- ✓ Pourcentage de gravier G3/8= 10% ;
- ✓ Pourcentage de gravier G8/15 =28% ;
- ✓ Pourcentage de gravier G15/25 = 29%.

4-3-2. Composition du béton de fibre

Après la formulation du béton classique nous déduisons les dosages nécessaires pour la composition du béton de fibre selon la méthode de BARON LESAGE.

Les quantités en poids pour la composition de béton classique et de fibre sont données dans le tableau 4-8, avec la dénomination suivante:

- BC1 est le béton classique sans fibre ;
- BF1 est le béton de fibre de palmier dattier (longueur des fibres est 60 mm et le dosage massique égal à 0.3%).

Tableau 4-8: Les compositions des bétons classiques et béton des fibres pour un mètre cube

Type de béton	Ciment (kg)	Sable (kg)	Gravier (kg) Classe : poids	Fibres (kg)	Eau (kg)	Adjuvant (kg)	Affaissement
BC1	400	620.23	3/8 : 188.52 8/15 : 522.22 15/25 : 545.022	--	200	--	70±10
BF1	400	618.15	3/8 : 187.3 8/15 : 524.5 15/25 : 543.22	2.78	200	0.4%	70±10

L'introduction d'une certaine quantité de fibres dans une matrice de béton avec ou sans gravier diminue d'une manière significative la maniabilité. À cet effet, l'ajout d'un adjuvant (super-plastifiant) afin d'améliorer cette dernière est souvent nécessaire dans la composition des bétons renforcés par des fibres de palmier dattier -voir la figure 14 en annexe- La quantité de fibres incorporées est 0.3% en dosage massique avec une longueur de 60 mm ; ce choix est inspiré de l'étude préalable de MERKHOUI[3] car cette longueur a donné des meilleurs résultats.

dans notre étude, nous avons utilisé des éprouvettes prismatiques de 100x100x400mm³ pour les essais mécaniques, et de dimension 70x70x280mm³ pour les essais de retrait. Premièrement, Nous mélangeons le sable, le gravier, et le ciment à sec pendant 60 secondes. Les fibres sont incorporées par petites quantités, afin de permettre aux fibres d'être distribuées d'une manière homogène. L'ajout de la quantité d'eau mélangée avec le super-plastifiant, puis malaxage de l'ensemble pendant 3 minutes. Le remplissage des moules est réalisé en deux couches avec une vibration pour chacune pendant 30 secondes. Les éprouvettes sont conservées à l'air libre ; Après 24 heures de durcissement, elles sont démoulées et plongées dans l'eau à (25 ± 2C°) pendant une durée de 14 jours. Ensuite, les éprouvettes sont retirées de l'eau et exposées aux conditions d'air libre (T = 30 ± 5° C, HR = 32.2 ± 2%) jusqu'à la date d'essais. En effet, KRIKER [4] a constaté que d'une façon optimale une période d'humidification initiale de 14 jours est nécessaire, afin d'améliorer les performances mécaniques des bétons dans les climats chauds et secs.

Dans notre travail, le nombre d'éprouvettes utilisées par essai et par échéance est six.

En plus de béton témoin sans fibres BC1; nous avons préparé deux types de bétons renforcés, l'un est le BF1 où l'éprouvette est complètement composée d'un béton de fibre selon la composition indiquée au tableau 4-5, le deuxième type : est un béton de fibre stratifié nommer le BF1S où nous décomposons l'éprouvette en deux parties identiques et parallèles au plan d'inertie max: une partie inférieure constitue d'un béton de fibre BF1, et une deuxième partie au-dessus la première partie composée d'un béton classique BC1 (50% BF1+50% BC1) comme il est schématisé dans la coupe transversale de la figure 4-2.

Pourquoi et sur quelle base ce choix du BF1S? Pour répondre à cette question il faut noter que l'utilisation des fibres comme éléments d'amélioration de la résistance à la flexion et l'ouverture de la fissuration est largement détaillée dans le deuxième chapitre, suivant les études de plusieurs chercheurs [4,50,55,78,79]

Les fibres comme les aciers travaillent mieux à la flexion, donc nous gardons la partie comprimée située au-dessus de l'axe neutre tel qu'elle est composée du béton classique, et nous ajoutons les fibres seulement dans la partie nécessaire (partie tendue) comme il est schématisé dans la figure 4-1 ci-dessous.

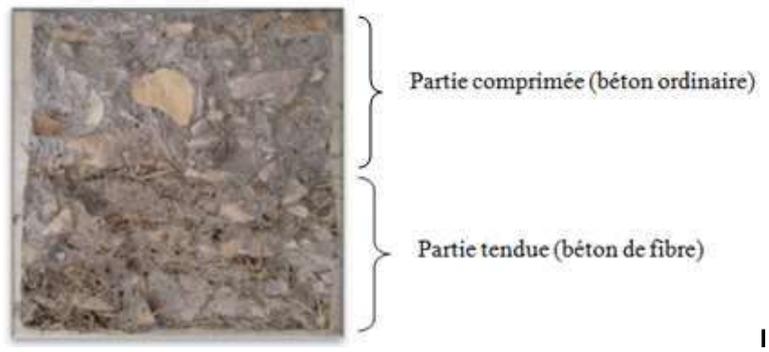


Figure 4-1 Coupe transversale d'une éprouvette BF1S

La figure15 en annexe donne les coupes transversales des trois types du béton BC1, BF1 et le BF1S.

4-4 Propriétés mécaniques :

4-4-1. Résistance à la compression

La résistance à la compression des différents types des bétons (BC1, BF1, et BF1S) est mesurée sur des éprouvettes cubiques (100 mm d'arête) conformément à la norme NF EN 12390-4 [106], par une presse CONTROLS (figure 16 en Annexe) avec une vitesse de chargement de 3 ± 0.5 KN/s ; La forme des éprouvettes après l'écrasement est donnée dans la figure 17 en annexe.

Dans le cas du béton stratifié BF1S la position de l'éprouvette, est celle schématisée dans la figure 4-1 donnée au-dessus.

Le tableau 4-9 donne la résistance moyenne à la compression des bétons suivant l'âge.

Tableau 4-9 : La résistance à la compression des différents types du béton

Désignation	Résistance à la compression en MPa				
	7 jours	14 jours	28 jours	90 jours	180 jours
BC1	27.06 ± 0.95	28.02 ± 1.3	29.34 ± 0.4	30.6 ± 0.6	30.71 ± 1.7
BF1	22 ± 1.2	24 ± 0.78	25.5 ± 1.1	25 ± 0.45	24.7 ± 0.4
BF1S	23 ± 0.8	27.5 ± 1.5	28.84 ± 0.97	28.8 ± 2.01	28.8 ± 0.78

Nous remarquons que :

- Pour les 28 premiers jours à 90 jours, tous les différents types du béton présentent une évolution positive de la résistance à la compression
- La résistance à la compression de béton de fibre (BF1) est assez faible par rapport le béton témoin, cette remarque est en accord avec les résultats de la littérature et spécialement [2-4 ; 30 ; 43] qui affirment que l'ajout des fibres végétales au béton n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression ; KRIKER [4] a justifié la diminution de la résistance à la compression dans le cas d'utilisation du béton de fibres de palmier dattier par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice du béton augmente le volume des vides et diminue la compacité du béton d'où une diminution de la résistance à la compression.
- La résistance à la compression de béton stratifié (BF1S) à peu près égale la résistance de béton classique (BC1) et cela peut être à cause que la partie de béton de fibre à

une faible résistance de compression donc aucun effet bénéfique d'incorporer les fibres ; ce qui provoque des résistances à la compression à peu près sont égaux.

- Après 90 jours, nous remarquons qu'il y a eu une légère chute de résistance à la compression pour les bétons de fibres, cette remarque est coïncide avec les résultats de MOKHTARI[43] lors d'utilisation d'un mortier de fibre de palmier dattier. Cela peut être dû à la chute de durabilité des fibres dans la matrice cimentaire, car l'absorption de fibres végétales d'eau à un effet négatif sur la résistance et la cohésion entre les différents composants de ciment, par conséquent : une extension des microfissure entre la fibre-matrice, à cause des conditions climatiques chaudes et sèches. Par contre, le béton classique a gardé sa résistance presque constante.

4-4-2. Résistance à la flexion du béton classique et de fibre

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour un béton de fibre car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de chargement dans ces applications. On ajoute des fibres dans la matrice béton pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration.

Les caractéristiques de flexion des bétons sont déterminées par un essai de flexion quatre points à l'aide d'un dispositif expérimental conforme aux normes NFP 18-407 et NFP 18-409 [107,108].

La presse universelle utilisée est de type CONTROLS (figure18 en annexe). La vitesse de chargement est de 0.5KN / min jusqu'à la rupture.

La presse est équipée par un dispositif pour mesurer la flèche au milieu de l'éprouvette qui est composé par deux capteurs de déplacement. Afin de mesurer la flèche nette, ce dernier dispositif s'appuie directement sur l'éprouvette elle-même (figure19 en annexe).

La charge maximale atteinte au cours de l'essai est enregistrée, et la résistance est calculée suivant la formule 4-1

$$\sigma_F = 6M / bh^2 \quad (4-1).$$

Avec :

σ_F : résistance à la flexion MPa

M: moment maximal en flexion

b: largeur d'éprouvette.

h: hauteur d'éprouvette.

Rappelons que les éprouvettes utilisées ont des dimensions de 100*100*400 mm³.

Les résultats de la résistance à la flexion pour différents types du béton sont présentés dans le tableau 4-10 Ci-dessous:

Tableau 4-10 Résistance à la flexion pour différents types de bétons

Désignation	Résistance à la flexion en MPa		
	28 jours	90 jours	180 jours
BC1	6.53±0.2	6.58±0.3	6.66±0.1
BF1	6.15±0.8	6.37±0.5	6.78±0.4
BF1S	7.20±0.74	7.40±1.2	6.88±1

Nous remarquons que :

- la résistance à la flexion de béton stratifié est légèrement supérieure par rapport les autres types, car les fibres -comme les aciers- travaillent mieux à la flexion.
- Le béton complètement fibré présent la faible résistance
- D'un point de vue économique : le béton BF1S est mieux que le béton de fibre (complètement fibre) vu la quantité des fibres utilisée.

4-4-3. Mesures de la flèche et de l'ouverture de fissuration

Pour mesurer la flèche au milieu des éprouvettes ; un dispositif composé de deux comparateurs de déplacement sont fixés directement sur l'éprouvette elle-même.

Afin de localiser l'ouverture des fissurations, un traçage sur les éprouvettes en forme de quadrillage gradué de 25 mm a été effectuée [25,109] (voir figure 4-2)



Figure 4-2 Eprouvette graduée 25mm

Pendant le chargement nous contrôlons d'une part l'évolution de la flèche par la lecture directe sur les capteurs de déplacement, la position de ces derniers est schématisée dans la

figure 4-3.ci-dessous, et d'autre part l'ouverture de fissuration par la variation des dimensions de quadrillage [109].

La mesure d'ouverture de fissure est déterminée à l'aide d'une réglette métallique, elle est bien graduée.



Figure 4-3 positions des comparateurs sur l'éprouvette

Si nous comparons entre les différents modes de fissuration lors des essais mécaniques de flexion (figure 4-4), nous observons que le mode de rupture pour les éprouvettes en béton classique ordinaire (BC1) est du type fragile (rupture brutale) ceci est dû à sa faible résistance à la traction. Alors que pour les bétons en fibres (BF1, et BF1S), nous observons une rupture ductile avec une densification des microfissures. Ceci s'explique par l'efficacité de l'ajout des fibres, dont le rôle est de stopper ou limiter la propagation rapide des fissures par couture des lèvres de fissures, cette remarque est coïncide avec les observations de GERMITI[25] lors des études de variation de la flèche pour les bétons de fibres métalliques.



A: Béton Classique BC1



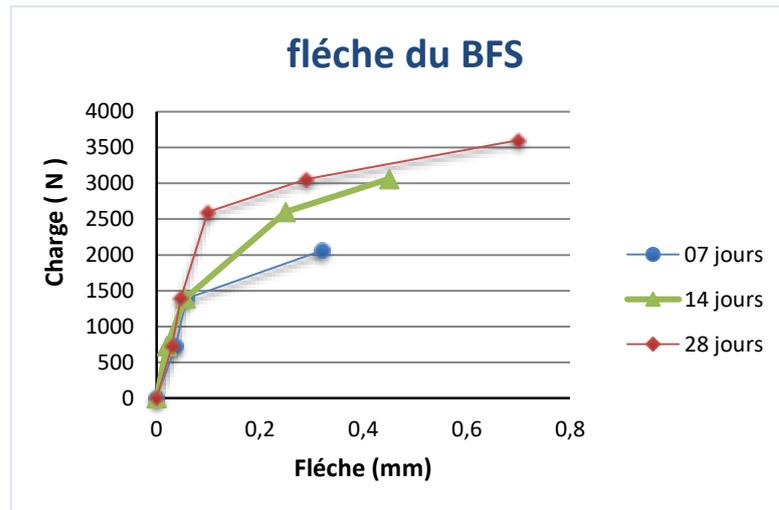
b: Béton de Fibre BF1



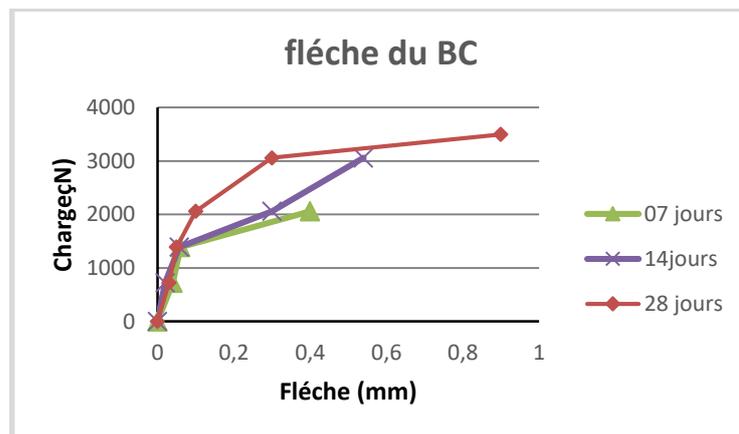
C: béton stratifié BF1S

Figure 4-4 : Fissurations des trois types du béton (BC1 BF1 BF1S)

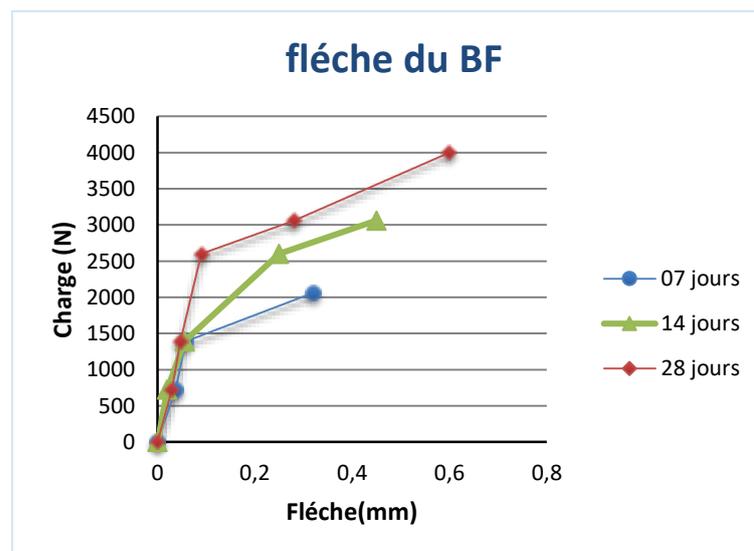
La variation de la flèche pour différents types de béton est illustrée par les graphes de la figure 4-5 ci-dessous



A : béton de fibre stratifié BF1S



B : béton classique BC1



C : béton de fibre BF1

Figure 4-5 : variation de la Charge- flèche pour différents types du béton

Les graphes de la figure 4-6 donnent le comportement à la flexion représenté par les courbes charge-flèche des bétons BC1, BF1, et BF1S conservés dans l'eau à ($25 \pm 2C^\circ$) pendant une durée de 14 jours et exposées aux conditions d'air libre de ($T = 30 \pm 5C^\circ$, $HR = 32.2 \pm 2\%$) jusqu'à la date d'essais ; les mesures sont données aux trois âges significatifs : sept jours , quatorze jours et vingt-huit jours.

Les courbes (force-flèche) de la figure 4-6 montrent qu'il y a trois phases à caractériser, cette observation est coïncide avec les résultats de plusieurs chercheurs [2-4 ; 30 ; 43] :

1ère phase : Au début de l'essai, nous remarquons que l'augmentation de la charge en fonction de la déflexion suit un comportement élastique et linéaire, la flèche croit linéairement avec la charge. Cette phase s'étend jusqu'à environ 2KN, la flèche mesurée atteinte 0.1 mm pour les trois types du béton, ce qui probablement, à cause que les fibres n'interviennent pas, seules les caractéristiques de la matrice qui régissent ce comportement ; comme été cité dans la recherche bibliographie.

2ème phase " début de fissuration ", Avec la progression du chargement, la flèche atteinte est de 0.3 mm pour les bétons classiques, environ 0.29 mm pour les bétons stratifiés, et 0.28 mm pour les bétons de fibre ; ces mesures correspondent à une évolution de la charge de l'ordre 3KN.

3ème phase : La flèche mesurée à mi-travée dans cette phase est de 0.7mm pour les bétons stratifiés, 0.9 mm pour les bétons classiques, et 0.6 mm pour les bétons de fibre ; la charge de rupture (par flexion) est respectivement pour les bétons classiques, stratifiés, et de fibre 3.5 KN, 3.6 KN, et 4 KN

Dans le cas du béton de fibre, nous remarquons que la flèche atteint la valeur 0.6 mm pour un taux de chargement assez élevé (4.5 KN).

D'après la figure 4-5, l'effet positif des fibres est clair pour la diminution de la fissuration en flexion ; vu que la flèche de BF1 est nettement inférieure aux deux bétons BC1 et le béton stratifié BF1S, cette diminution peut être causé par l'augmentation du dosage en fibres par rapport les deux types du béton.

4-4-4. Essais d’auscultations dynamiques

La mesure du temps t de l’onde longitudinale ultrasonique (figure 20-A annexes) est effectuée dans le but du calcul plusieurs paramètres qui nous donnent une idée sur la compacité et la présence des vides dans les matériaux, cette propriété nous donne une idée pour bien interpréter les résultats de la résistance à la compression.

Les résultats moyens de vitesse de propagation du son et le module d’élasticité sont indiqués sur le tableau 4-11 et schématisés sur les courbes de la figure 4-6.

Tableau 4-11 : Résultats d’essai d’auscultation dynamique pour différents types de béton.

	Age (jours)	BC1	BF1	BF1S (H/V)*
Vitesse de propagation V (m/sec)	7	3851±12	2995±24	3464±43/3624±21
	14	3858±20	3031±27.8	3681±23/3809±17
	28	3941±16	3634±57	3742±10/4217.5±24
Module d’élasticité E _d (MPa)	7	31089.59±104	16550.5±72	26218.55±20/28379.26±41
	14	31542.15±24	16795.74±11	27883.07±11/30070.42±08.2
	28	33340.76±48.7	25995.53±28	28281.15±14/35925.24±7.3

H/V indique les deux sens de mesure : H sens horizontal, V : sens vertical.

Les figures 20-B et 20-C en annexe, montrent la position des pôles ultrasoniques suivant les deux sens horizontal et vertical.

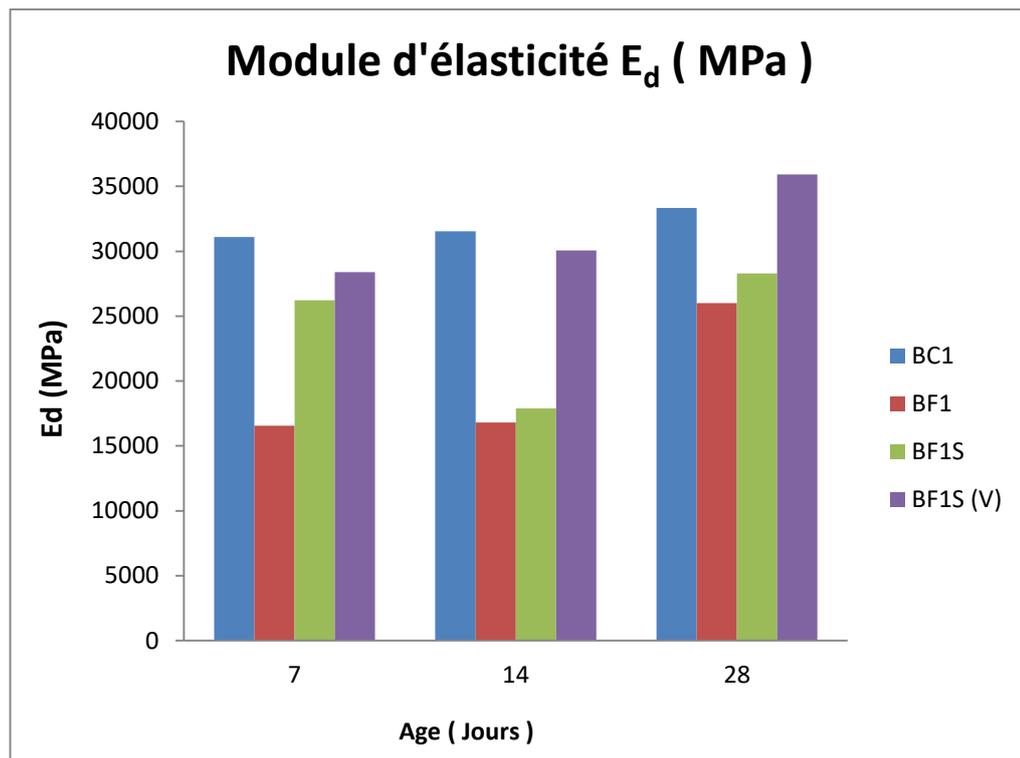


Figure 4-6: Module d'élasticité des 3 types des bétons

À la lumière des résultats d'évaluation de module d'élasticité nous constatons que pour une durée de vie inférieure à 28 jours le béton totalement fibré, présent un module d'élasticité E_d inférieur par rapport les autres types de béton, quoiqu'une augmentation apparente à 28 jours et cela peut être dû à la présence des pores dans la matrice cimentaire, ce qui diminuée le module d'élasticité et par conséquent la résistance, cette remarque coïncide avec les résultats de KRIKER [4] lors de la mesure d'indice de continuité I_c pour différents types de béton de fibre de palmier dattier, rappelons que selon GORISSE l'indice I_c est le rapport entre la vitesse de propagation du son à travers le matériau testé et la vitesse de référence, KRIKER [4] a remarqué que tous les bétons de fibres conservés dans l'air ou dans l'eau présentent des indices de continuité plus faibles que celui du béton classique

KRIKER[4] a constaté que l'augmentation du dosage et de longueur des fibres dans la matrice, diminue la compacité et augmente le volume global des vides et par conséquent une diminution de la résistance.

Pour le béton stratifié nous observons une légère diminution par rapport le béton classique et cela avant les 20 premiers jours, mais à partir de 28 jours on observe que le béton stratifié présent un module dynamique assez élevé par rapport le béton

classique, ce qui nous encourage à intensifier les efforts pour mieux étudier ce type de béton ; dans le même axe de mesure du module d'élasticité pour le béton stratifié, nous remarquons que ce dernier est légèrement élevé dans le sens vertical par rapport au sens horizontal ; et cela peut être dû à l'homogénéité proportionnelle des mesures verticalement par rapport au sens horizontal où la position des deux pôles peut être fixée uniquement dans la zone de béton de faible module d'élasticité.

4-5. Essais sur le retrait :

4-5-1. Essais sur le retrait de béton :

Les essais de retrait de béton sont effectués sur des éprouvettes 7x7x28 cm³ suivant la norme NF P 18-433 [110] à l'aide d'un rétractomètre type PERRIER 50.75 (figure 20 en Annexe), les résultats de la variation de retrait suivant le temps est donnée dans le tableau (4-11)

Les bétons utilisés sont: le BC1 et le BF1, où les compositions sont données au tableau 4-7.

Rappelons que le mode de conservation est le suivant

- Pour les premiers 14 jours : dans l'eau à (25 ± 2° C)
- Air libre : T°=30 ± 5 °C, HR= 32.2 %± 2%)

Les résultats de retrait sont illustrés dans le tableau 4-12 ci-dessous.

Tableau 4-12 : Résultats de retrait

Age en jours	Retrait BC (10 ⁻⁶ m/m)	Retrait BF (10 ⁻⁶ m/m)
1	49 ±0.5	44±0.3
2	80 ±0.24	76±1.5
3	128 ±0.8	123±0.74
7	194 ±0.2	192±0.87
14	249±0.71	247±0.4
28	311±0.9	287±0.57
90	315±1.1	300±0.3

L'effet des fibres est très remarquable pour la diminution de retrait, et cela est en accord avec plusieurs recherches [3, 4, 9, 22,25, 36,42, 64, 70, 112,114]

4-5-2. Expositions des travaux de KRIKER ET MERKHOUFI sur le retrait.

Dans la prochaine partie expérimentale de modélisation, nous serons proposés des modèles empiriques applicables pour notre béton; Pour une meilleure validation de ces modèles nous les appliquer sur le béton et le mortier d'autres chercheurs KRIKER [4] et MERKHOUFI [3]

Dans ce qui suit ; nous serons résumés les travaux de ces deux chercheurs.

4-5-2-1. Compositions et modes de conservation :

Les propriétés des granulats utilisés par les deux chercheurs KRIKER [4] et MERKHOUFI [3] sont déterminées au tableau 4-13 ci- dessous ; notons que la dénomination S1 et G1 respectivement, est le sable et le gravier utilisés par MERKHOUFI [3], ainsi que le S2 et G2 sont respectivement le sable et le gravier utilisés par KRIKER [4], rappelons que les propriétés des granulats (sable "S" et gravier "G") utilisés dans notre béton sont données dans le tableau 4-1.

Tableau 4-13 : Propriétés des granulats utilisés par KRIKER et MERKHOUFI

Propriétés	Type de granulat			
	Sable (S1)	Sable (S2)	Gravier (G1)	Gravier (G2)
Nature	Naturel	Naturel	Concassé	Concassé
Provenance	H.Sayeh ouargla	H.Sayeh Ouargla	Haoud hamra Ouargla	H-Messaoud Ouargla
Classe	0/5	0/5	5/16	5/16
D max (mm)	5	5	16	16
Mf	2.77	2.7	--	--
ES (%)	75	88 (après lavage)	--	
Masse volumique	1667	1605	1353	1600

apparente. (Kg/m3)				
Masse volumique absolue. (Kg/m3)	2530	2500	2380	2560
Analyse granulométrique	Tableau 02/Annexe	Figure 21/annexe	Tableau 03/Annexe	Figure 21/annexe
Propreté %	0.92	0.89	0.8	0.7
Dureté LA	---	---	30	28

Commençant par la composition de MERKHOUI [3], cette dernière est détaillée sur le tableau (4-14) :

Tableau 4-14 : Composition de béton de fibres de palmier dattier utilisé par MERKHOUI [3]

Les composants	Dosage	Provenance
Ciment CPJ 45	400 kg/m3	Usine Ain Toutta- Algérie
Sable S1	774.60 kg/m3	Hassi Sayeh-Ouargla- Algérie
Gravier G1	1105.88 kg/m3	Haoud Elhamra-Ouargla- Algérie
Eau	200 l/ m3	Eau potable -Ouargla- Algérie
Fibres	0.2 à 0.5%(dosage massique)	Palmier dattier – Ouargla
Super-plastifiant : MEDAPLAST-SP	0.4%	---

Les éprouvettes de dimensions : 7x7x28 cm ; sont conservées soit à l'air libre ayant une température $T^{\circ}=30 \pm 5$ °C et une humidité relative HR= 32.2 % ou bien sont protégés par toile de Jute et arrosage deux fois par jour pour avoir un ambient humide.

La dénomination utilisée par MERKHOUI est la suivante :

BFC : béton de fibre de palmier dattier conservé à l'air libre mais couvert avec toile de jute et arrosé deux fois par jour.

BTC : béton témoin conservé à l'air libre mais couvert avec toile de jute et arrosé deux fois par jour.

BTL, BFL : respectivement, béton témoin et béton de fibre de palmier dattier conservé à l'air libre.

Concernant les études de KRIKER[4] sur le mortier de fibre où la composition est donnée au tableau 4-15

Tableau 4-15 : La composition de mortier de fibres de palmier dattier par moule [4]

Type de Mortier	% en vol. de fibres	Longueur de fibre (mm)	Ciment (g)	Sable S2 (g)	Fibre (g)	Eau Totale (g)	Temps d'écoulement (s)
MF	1.00	15.00	450.00	1343.09	6.91	238.50	8±2
		60.00				247.50	
	3.00	15.00		1329.63	20.37	270.00	
		60.00		292.50			
	6.00	15.00		1308.54	41.46	301.50	

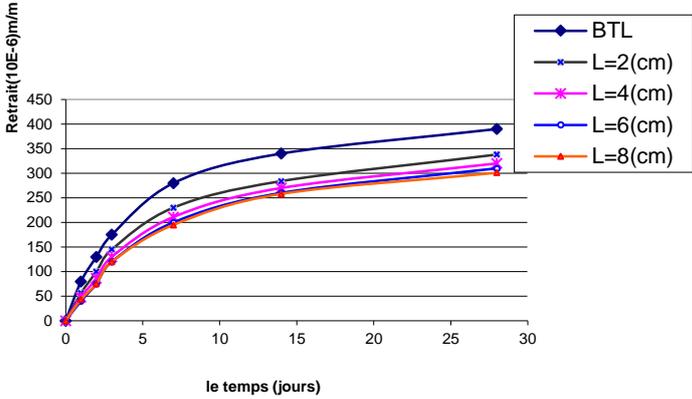
Les éprouvettes utilisées sont de dimensions 40x40x160 mm, conservées dans différentes cures :(CU, CE7-CU et CE14-CU) jusqu'à la date de mesure :

- CU: conservation dans l'étuve sous les conditions $T = 32 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 28\% \pm 2$.
- CE7-CU: conservation les 07 premiers jours dans une chambre humide et saturée sous des conditions climatiques de $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 100\%$ ensuite dans l'étuve sous les conditions $T = 32 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 28\% \pm 2$.
- CE14-CU: conservation les 14 premiers jours dans une chambre humide et saturée sous des conditions climatiques de $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 100\%$ ensuite dans l'étuve sous les conditions $T = 32 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} = 28\% \pm 2$.

4-5-2-2.Résultats de retrait:

Les résultats de retrait donnés par MERKHOUI [3] et KRIKER[4] sont résumés avec commentaires sur les graphes des tableaux 4-16 et 4-17

Tableau 4-16: Résultats expérimentaux du retrait du béton de fibre de palmier dattier de MERKHOUI [3,112]

Graphe	Commentaires
 <p data-bbox="272 902 1007 965">Figure 4-7 : Variation du retrait de béton de fibre(l=6cm,0.4%) pour différentes longueurs(conservation à air libre)</p> <p data-bbox="309 1429 979 1491">Figure 4-8 : Variation du retrait de béton de fibre(l=6cm) pour différents % de fibres(conservation à air libre)</p> <p data-bbox="225 1944 1031 2007">Figure 4-9 : Variation du retrait de béton de fibre pour différents modes de conservation (l=6cm, 0.4%)</p>	<p data-bbox="1086 633 1469 723">MERKHOUI [3] trouve que :</p> <ul data-bbox="1086 745 1469 1055" style="list-style-type: none"> - le retrait final diminue avec l'augmentation de la longueur des fibres après 28 jours; quoique les retraits des BF se rapprochent, ils restent inférieurs au BT. <p data-bbox="1086 1435 1469 1686">-Avec le pourcentage 0.5 et la longueur 6 cm, le retrait du béton de fibre est supérieur au retrait du béton témoin.</p> <p data-bbox="1086 1709 1469 1843">Par contre, les autres BF présentent un retrait inférieur au béton témoin.</p>

	<p>-Diminution de retrait de bétons renforcés par les fibres de palmier dattier et le béton témoin couverts par les toiles par rapport à ce qui est exposé à l'air libre.</p> <p>-la couverture par les toiles de jute et l'arrosage donne une certaine humidité par rapport à l'air libre ce qui réduit le taux d'évaporation de l'eau d'où la diminution du retrait.</p>
--	--

Tableau 4-17: Résultats expérimentaux du retrait du mortier de fibre de KRIKER [4,112]

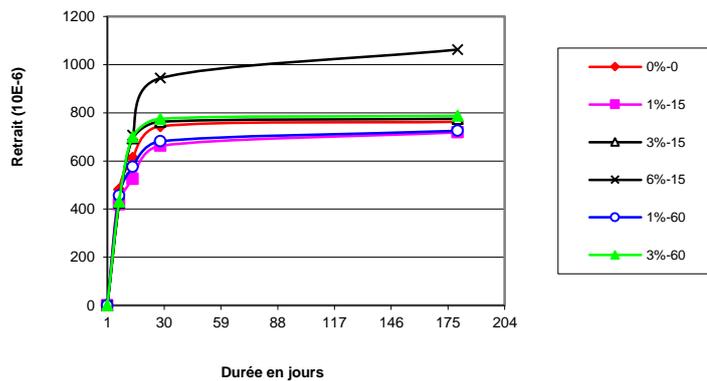


Figure 4-10 : Retrait des mortiers de fibres de palmier conservés dans l'étuve (CU)

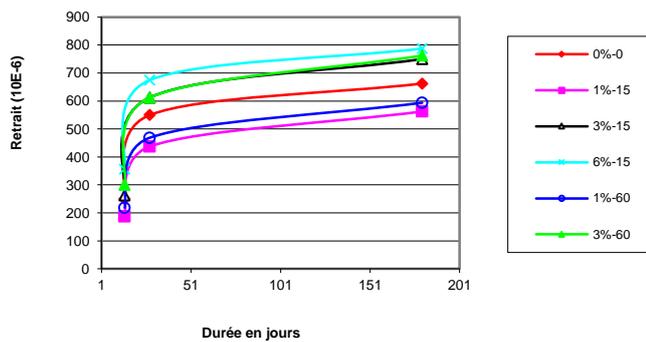


Figure 4-11 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE7-CU

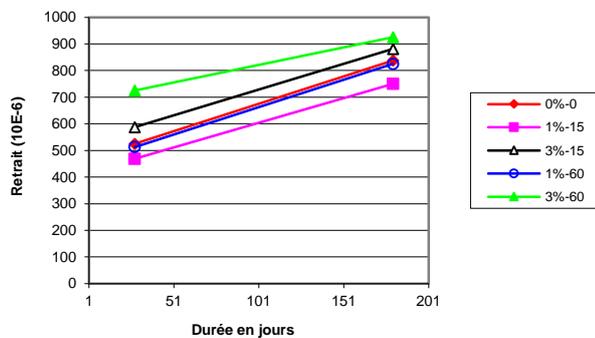


Figure 4-12 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE14-CU

KRIKER[4] a conclu que les deux régimes de cure CE7-CU et CE14-CU ont permis de réduire le retrait de mortier par rapport à ceux conservés directement dans l'étuve CU, mais les taux de réduction les plus élevés sont obtenus avec le régime CE7-CU. Les retraits les plus inférieurs sont obtenus pour 1% en fibres.

4-6. Conclusion

Cette partie est consacrée essentiellement à l'étude du béton de structure, renforcé par les fibres de palmier dattier pour pouvoir comparer les résultats expérimentaux que nous avons réalisés avec ceux effectués ultérieurement par les membres de notre équipe de recherche avec bien sûr des compositions et conditions climatiques rapprochés.

À la lumière des résultats obtenus par les essais mécaniques réalisés dans le cadre de cette recherche, nous ont permis d'extraire un certain nombre de points :

- Parmi les inconvénients des fibres, nous observons que l'ouvrabilité diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage des fibres pour cela, nous avons utilisé un super plastifiant pour pouvoir travailler avec un rapport E/C constant et égale à celui du béton classique.
- Les deux résistances : à la flexion et à la compression du béton de fibres augmentent en fonction d'âge.
- Pour la résistance à la compression, nous remarquons que cette résistance diminue avec l'augmentation du pourcentage des fibres, et cela est en accord avec la littérature, en effet, la majorité des auteurs rapportent que l'ajout des fibres végétales au béton ou au mortier n'améliore pas sa résistance à la compression.
- La résistance à la flexion s'améliore avec l'incorporation des fibres
- L'utilisation d'un béton stratifié améliore les caractéristiques mécaniques du béton.
- Le dosage et l'élanement de fibres semblent être les facteurs les plus importants qui diminuent le retrait.
- l'efficacité des fibres apparaitre au cours d'essais de flexion, elles servent d'élément de couture sur les lèvres des fissures, donc leur rôle essentiel est de stopper ou limiter la propagation rapide d'ouverture de fissuration.

Modélisation de retrait et de fissuration des bétons de fibres de palmier dattier

5-1.Introduction

Dans la littérature les modèles de prédiction de retrait et de fissuration du béton ordinaire ou de fibres métalliques sont nombreux, contrairement aux bétons de fibres de palmier dattier.

De même, de nombreux chercheurs qui étudient l'amélioration du retrait et de fissuration des bétons renforcés par les fibres de palmier dattier, recommandent la nécessité de la modélisation de ces phénomènes.

L'objectif de ce présent chapitre est la modélisation du retrait et de fissuration en flexion des bétons et mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier. Nous rappelons que notre étude est une continuité des travaux de recherche de MERKHOUI [3] et KRIKER [4].

Pour la modélisation de ces deux phénomènes rhéologiques, nous nous basons sur le modèle YOUNG et CHERN, et sur celui de HOUARI H [36].

Nous utiliserons le MATLAB pour la prédiction numérique du retrait de béton de fibre de palmier dattier et logiciel ANSYS pour la modélisation de fissuration en flexion.

La dénomination utilisée est la suivante :

BF X –Y : Béton de Fibre. X est le pourcentage massique de fibres, et Y la longueur en millimètres de ces fibres.

Exemple : BF 0.4 – 60 : Béton de Fibre avec un pourcentage massique de fibres égal à 0.4% et de longueur de 60mm

MF X - Y : Mortier de Fibre. X est le pourcentage massique de fibres, et Y la longueur en millimètres de ces fibres.

Exemple : MF 1 – 15 : mortier de fibre ayant un pourcentage volumique de fibres, égal à 1% et de longueur de 15mm.

5-2. Définitions:

Pour l'élaboration des modèles de retrait et de fissuration les logiciels utilisés sont le MATLAB et l'ANSYS. Concernant l'ANSYS (*ANalysis SYStem*), ce logiciel été détaillé dans le troisième chapitre. On ne donne définit donc dans ce chapitre que le MATLAB

MATLAB (*MATrix LABoratory*) [115, 116] est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement du même nom et utilisé pour le calcul numérique. Il est utilisé dans plusieurs domaines tels que l'ingénierie, les sciences, l'économie, l'industrie, et la recherche.

Le MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran.

Le langage MATLAB a été conçu par CLEVE MOLER a la fin des années 1970 à partir des bibliothèques : Fortran, LINPACK et EISPACK2.

Les chercheurs : JACK LITTLE, CLEVE MOLER et STEVE BANGERT créèrent la société The Math-Works en 1984 afin de commercialiser la version 1.0 de MATLAB

Le MATLAB a évolué par la suite, en intégrant par exemple la bibliothèque LAPACK en 2005, en se dotant de nombreuses boîtes à outils (*Toolbox*) et en incluant les possibilités données par d'autres langages de programmation .

5-3. Modélisation du retrait

5-3-1. Adaptation de l'expression de HOUARI

La formule empirique du retrait a été proposée par HOUARI [36] pour le béton renforcé par les fibres métalliques donnée dans le chapitre 3 (formule (3-65)), est :

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{0s} \cdot (1 - 0.041 \cdot V_f \cdot \frac{1}{d})$$

Cette formule prend en considération le retrait du mortier témoin ε_{0s} , le volume de fibre incorporé en pourcentage V_f , et l'élancement des fibres (la longueur de la fibre 'l' et le diamètre de la fibre 'd').

Après une série d'essais d'itération nous proposons une légère modification de cette formule pour permettre son application pour le retrait du mortier des fibres de palmier dattier. La modification consiste à remplacer le nombre 0.041 par 0.046, et prendre le paramètre "d" égal au diamètre moyen des fibres ; la nouvelle formule proposée sera donc :

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{0s} \cdot (1 - 0.046 \cdot V_f \cdot \frac{1}{d_m}) \quad (5-1)$$

Avec d_m est le diamètre moyen des fibres est pris égal à 0.45 mm[4]

Rappelons que la formule de HOUARI est initialement appliquée au retrait du mortier des fibres métalliques ; la nouvelle expression proposée peut être appliquée au mortier des fibres de palmier dattier, ainsi que pour les bétons renforcés par le même type de fibres.

Les deux figures : 22/annexe et 5-1 donnent respectivement le programme et le graphe de modélisation de retrait du béton de fibres de palmier dattier ayant un volume de fibres égal à 0.3% et longueur $l=60$ mm.

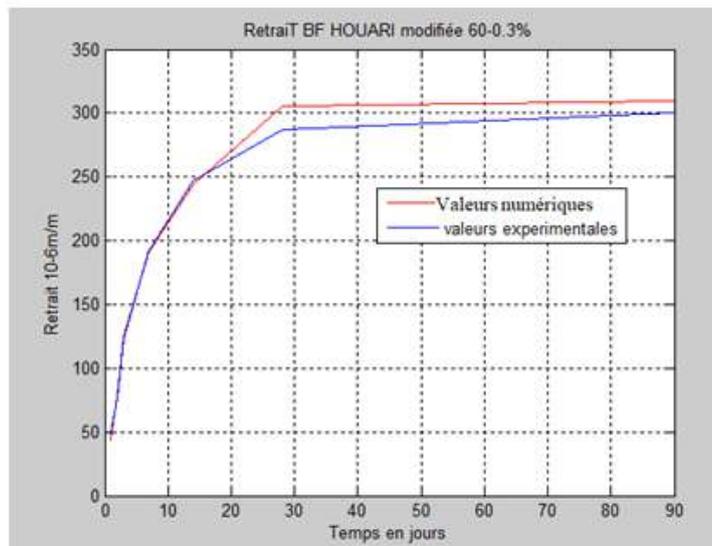


Figure 5-1: Modélisation de retrait du béton de fibre BF1 par modèle HOUARI

Tableau 5-1 : Taux de variation des résultats de retrait

Age en jours	1	2	3	7	14	28	90
TV	0.1186	-0.0333	-0.0215	0.0082	0.0105	-0.0637	-0.0307

D'après la figure 5-1 et le tableau 5-1, nous constatons une bonne corrélation entre l'expérimentale et le modèle numérique, avec un taux de variation n'excédant pas 12% surtout à jeune âge.

Ce taux est donné par la formule 5-2 suivante :

$$TV(\%) = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{modèle}}}{\varepsilon} \quad (5-2)$$

5-3-2. Adaptation de l'expression de HOUARI modifiée sur les résultats de retrait de MERKHOUI

Pour élargir le champ de validation de l'expression de HOUARI modifiée, nous l'appliquons sur le modèle de béton de MERKHOUI [3]. Rappelons que ce dernier utilise des bétons de fibre ayant une longueur variant entre $l=20\text{mm}$ et $l=80\text{mm}$ (avec un pas de 20mm), et un dosage massique en fibres variant entre 0.2 et 0.5% d'un pas égal à 0.1% .

Comme été indiqué dans le paragraphe 5-3-1 au-dessus, nous avons proposé une extension de l'application du modèle de HOUARI modifié pour l'adaptation sur le béton renforcé par les fibres ; on garde la même expression de retrait de mortier de fibre de palmier dattier par conséquent on garde le même programme de MATLAB sauf une légère modification dans la dénomination.

Les résultats de modélisation numérique de retrait par l'expression de HOUARI modifiée sur le béton de MERKHOUI sont représentés dans les graphes des figures 5-2 et 5-3. Le programme de modélisation de retrait pour différents types de béton de fibres est donné en annexe figure 23.

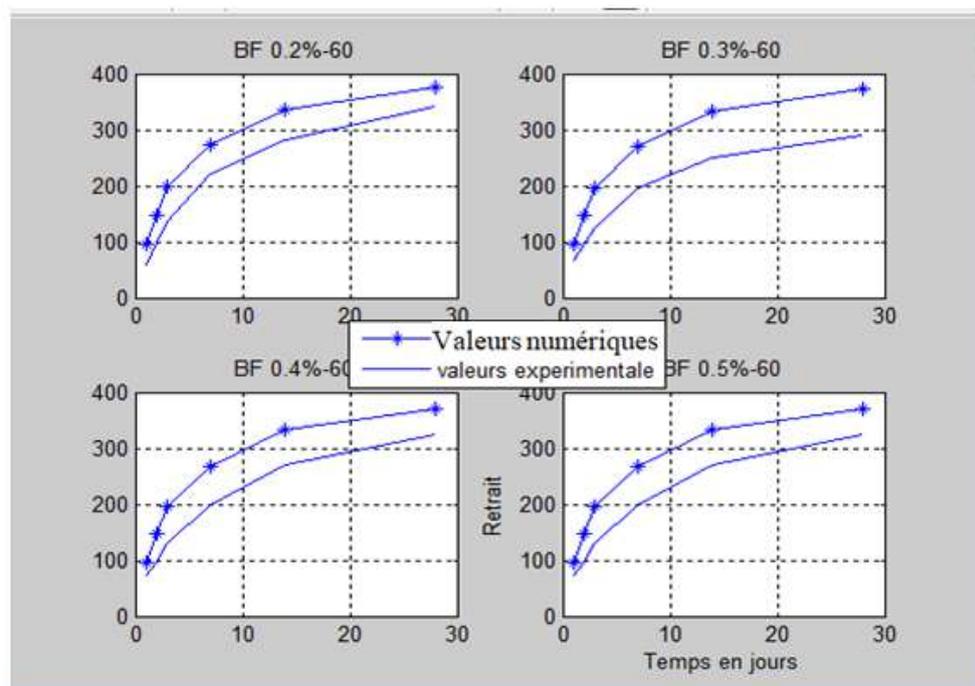


Figure 5-2 : Résultats de Modélisation de retrait du BF60 de MERKHOUI par l'expression du HOUARI modifiée

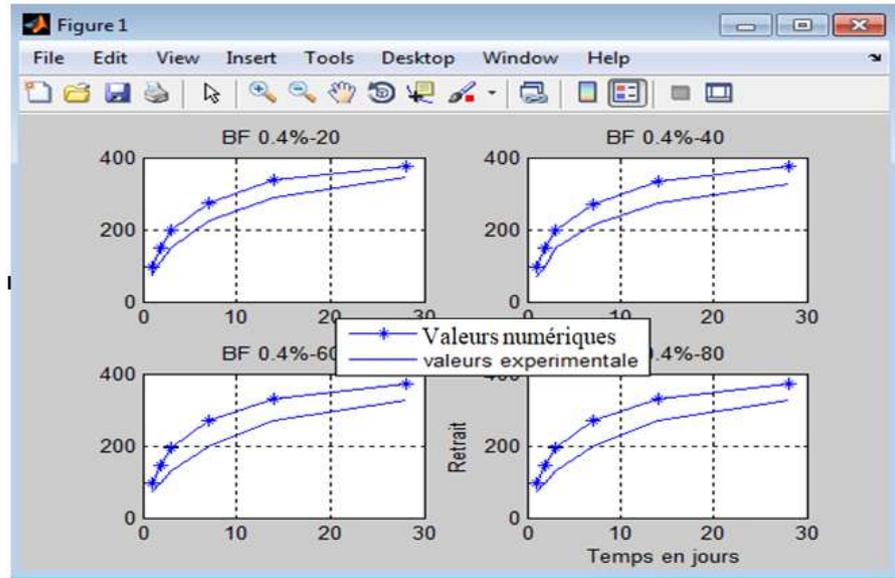


Figure 5-3 : Résultats de modélisation de retrait du BF0.4% de MERKHOUI par l'expression du HOUARI modifiée

En comparant les courbes théoriques et expérimentales du retrait de BFPD (figures 5-2et 5-3); nous remarquons que:

- Les courbes théoriques ont les mêmes allures que les courbes expérimentales,
- Une surestimation de retrait de béton fibré, mais le taux de variation tableau5-2 reste acceptable pour les premiers jours : inférieur à 50% dans la pluparts des types.
- Les meilleurs résultats de modélisation sont remarqués pour le BF 0.5-60

Tableau 5-2: Taux de variation des résultats de retrait de béton de MERKHOUI

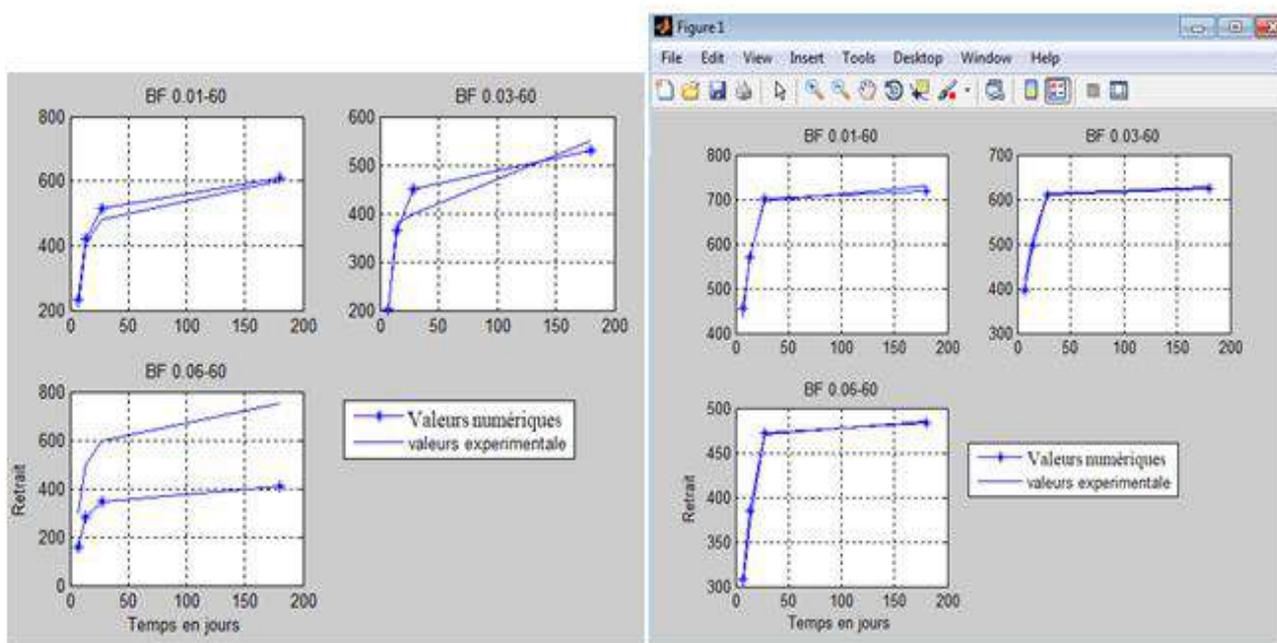
	Taux de variation TV(%)							
	L=60mm				0.4%			
Ageen jours	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%	20	40	60	80
1	-38.28	-41.46	-30.95	5.00	-34.99	-37.71	-30.95	-35.42
2	-51.18	-54.98	-54.02	-3.80	-35.54	-50.55	-54.02	-57.71
3	-46.33	-57.05	-50.07	3.06	-32.24	-31.15	-50.07	-61.21
7	-23.46	-38.43	-34.12	4.79	-21.22	-25.81	-34.12	-36.49
14	-19.93	-33.49	-22.83	5.83	-16.28	-21.61	-22.83	-26.49
28	-10.39	-28.62	-14.05	7.91	-9.24	-15.01	-14.05	-22.52

5-3-3. Application de l'expression de HOUARI modifiée sur les résultats de retrait de KRIKER

KRIKER [4] utilise des mortiers de fibre ayant comme longueurs égales à 60 mm et 15mm avec les divers pourcentages en fibres : (1%, 3% et 6%). Rappelons que les éprouvettes sont conservées dans les cures suivantes : CU, CE7-CU et CE14-CU.

Représentons sur la figure 5-4 les résultats de modélisation de retrait pour une conservation à l'étuve (CU) et une conservation sous les conditions CE7-CU pour les mortiers ayant une longueur 60mm.

Les programmes de modélisation de retrait des différents types de mortier de fibres sous les différents modes de conservation sont donnés en annexe figure 24 et 25



A-Conservation CE7-CU

B- Conservation CU

Figure 5-4 : Résultats de Modélisation de retrait du MF60 de KRIKER par l'expression du HOUARI modifiée

Le taux de variation obtenu, lors la modélisation des différents types de mortier de fibre (l=60mm), ainsi pour différents régimes de conservation est donnée dans le tableau 5-3.

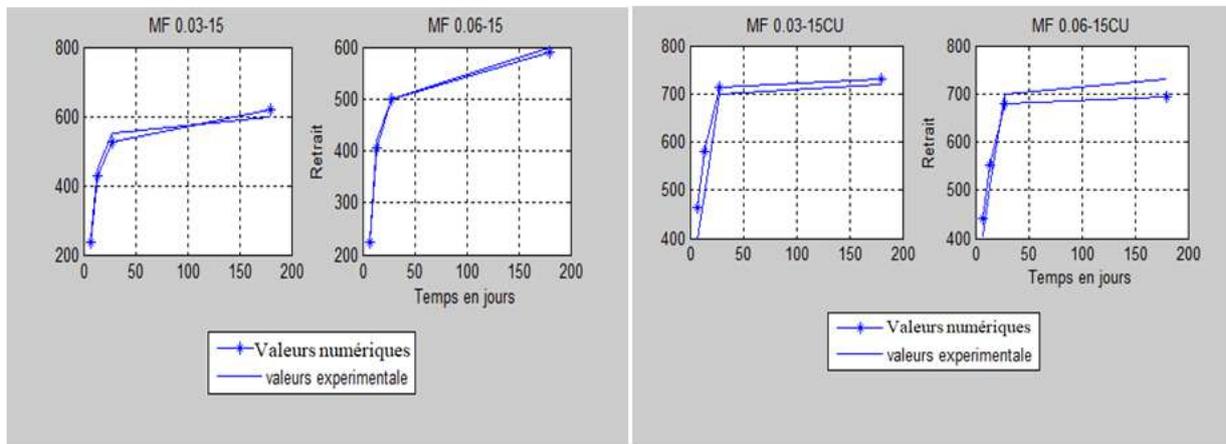
Tableau 5-3: Taux de variation des résultats de retrait de KRIKER pour le MF60

Age en jours	Taux de variation TV					
	Conservation CU			Conservation CE7-CU		
	6%	3%	1%	6%	3%	1%
7	-0.0221	- 0.0558	-0.0494	0.4775	-0.0118	-0.1085
14	-0.0390	0.0261	0.0046	0.4337	0.0380	-0.0257
28	-0.0034	0.0029	-0.0091	0.4207	-0.1220	-0.0756
180	0.0029	0.0041	0.0167	0.4523	-0.0356	-0.0169

La comparaison entre les courbes théoriques et expérimentales du retrait de mortier de fibres de palmier dattier (figure5-4) et le tableau5-3, montre que :

- Les courbes théoriques ont les mêmes allures que les courbes expérimentales pour tous les modes de conservation,
- Une bonne convergence lors de conservations dans la cure CU par rapport la cure CE7-CU, et le taux de variation n'excède pas 6%.
- Une sous-estimation de retrait de MF6%-60 lors de conservations dans la cure CE7-CU mais, l'allure du graphe et le taux de variation (enivrant 47%) restent acceptables.
- Une bonne corrélation est obtenue pour les mortiers renforcés par les fibres ayant une longueur de 60mm et un pourcentage volumique 1%(un taux de variation n'excède pas 5%).

Représentons sur la figure 5-5 résultats de modélisation de retrait des mortiers de fibre de KRIKER ayant une longueur égale à 15 mm par l'expression de HOUARI modifiée, pour les différents modes de conservation



A-Conservation CE7-CU

B- Conservation CU

Figure 5-5 : Résultats de Modélisation de retrait du MF15 de KRIKER par l'expression du HOUARI modifiée

Tableau 5-4 : Taux de variation des résultats de modélisation de retrait de KRIKER pour le MF15

Age en jours	Taux de variation TV			
	Conservation CE7-CU		Conservation CU	
	3%	6%	3%	6%
7	0.0536	0.0209	-0.1591	-0.0896
14	0.0502	0.0315	-0.1851	-0.0837
28	0.0460	0.0012	-0.0191	0.0300
180	-0.0335	0.0163	-0.0139	0.0482

La comparaison entre les courbes théoriques et expérimentales du retrait de mortier de fibres de palmier dattier MF15 (figure 5-5), et le tableau5-4, montre que:

- Les courbes numériques ont les mêmes allures que les courbes expérimentales pour tous les modes de conservation, et pour tous les différents types,
- Une bonne convergence lors de conservations dans la cure CE7-CU, car le taux de variation n'excède pas 6%.

5-3-4. Adaptation du modèle de Young et Chern au retrait du BFPD

Nous verrons dans ce qui suit, il est possible de regrouper les fonctions du modèle de Young et Chern, par un simple facteur Q lié au temps, afin d'estimer plus rapidement la déformation de retrait, le chemin de calcul à suivre est:

1- Calcul du retrait ultime :

La valeur du retrait ultime peut être obtenue en substituant les facteurs influençant le retrait du béton : la composition, le volume et l'élançement des fibres, c'est la même formule déterminée par Young et Chern (équation (3-66))

Le retrait ultime varie suivant le volume et l'élançement des fibres incorporées, bien que le retrait ultime regroupe beaucoup d'aspects et facteurs influençant le retrait du béton tel que :

- L'augmentation du rapport eau/ciment, à résistance égale donne un retrait plus élevé.
- Le béton ferme (moins d'eau) aura moins de retrait.
- Le retrait ultime à résistance égale diminue si la quantité de granulats augmente.

Ces remarques coïncident avec les données de la bibliographie.

2- Calcul de facteur d'humidité Kh

Le facteur Kh reste celui proposé par Young et Chern (équation (3-29))

Mais pour pouvoir adapter le modèle Young et Chern aux bétons de fibres végétales, nous avons

modifié l'expression de Young et Chern : $1.0805 \sqrt{\frac{t}{\tau_s + 1}} \cdot \sqrt{\frac{4 + 0.85(t + \tau_s)}{t + \tau_s}}$ par : un facteur Q, et

une fonction F(t), qu'iseront déterminés comme suit:

3- La fonction du temps F(t):

$$\left\{ \begin{array}{ll} F(t) = 1.625 - 0.00362.t & \text{pour } t \leq 28 \text{ jours} \quad (5-3) \\ F(t) = 0.751 - 0.0036.t & \text{pour } t > 28 \text{ jours} \quad (5-4) \end{array} \right.$$

Nous pensons que la formule F(t) dépend de plusieurs phénomènes liés au béton de fibre comme : l'absorption de l'eau par les fibres, l'évaporation de l'eau, maturité du béton car elle change l'allure à un âge très significatif (28 jours)

4- Le facteur Q: n facteur de section est proposé pour tient en compte l'effet dimensionnel sur le retrait, ce facteur est donné par la formule 5-5 suivante :

$$Q = \frac{2.69 \cdot F(t)}{s} \cdot t \quad (5-5)$$

Avec :

s : est la section transversale d'éprouvette donnée en cm^2 .

t : le temps en jours

De ce fait, nous proposons la formule suivante pour évaluer le retrait du béton de fibre de palmier dattier :

$$\varepsilon = 0.6408.kh. \left(\frac{t}{1+Q} \right). \exp(-1/2) \quad (5-6)$$

Avec: ε : est le retrait du béton de fibre de palmier dattier.

Kh : facteur d'humidité.

Q : facteur de section

La formule (5-6) proposée est similaire à la formule de Yong et Chern. Quelques modifications ont été faites pour son adaptation au béton de fibre de palmier dattier, ainsi que l'ajout du facteur de section Q qui prend en considération l'effet des dimensions de l'éprouvette.

La formule finale de prédiction de retrait du béton de fibre de palmier dattier à une allure parabolique grâce la fonction d'exponentielle, contrairement à la formule donnée par [111,112].

Le programme de modèle Young et Chern modifié est donné dans la figure 26 annexe.

Les résultats de modélisation de retrait par MATLAB du béton de fibre BF1 sont récapitulés sur la figure 5-6 et les taux de variation dans le tableau 5-9. Les résultats montrent qu'il ya une bonne corrélation entre l'expérimentaux et la modélisation avec un taux de variation inférieur à 30%.

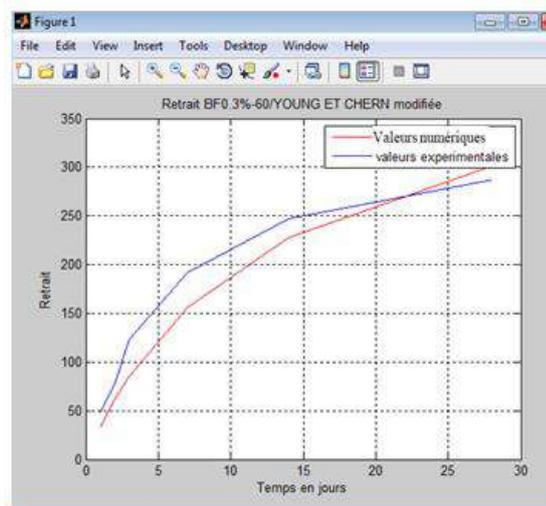


Figure 5-6 : Modélisation de retrait du BF1 par l'expression du YOUNG ET CHERN modifiée

Tableau 5-5 : Taux de variation de modélisation de retrait du BF1 par l'expression du YOUNG ET CHERN modifiée

Age en jours	1	2	3	7	14	28
TV	0.3257	0.1959	0.3067	0.1875	0.0771	-0.0504

Les résultats de modélisation du retrait du béton de MERKHOUI [3], par Young et Chern sont récapitulés dans la figure 5-7.

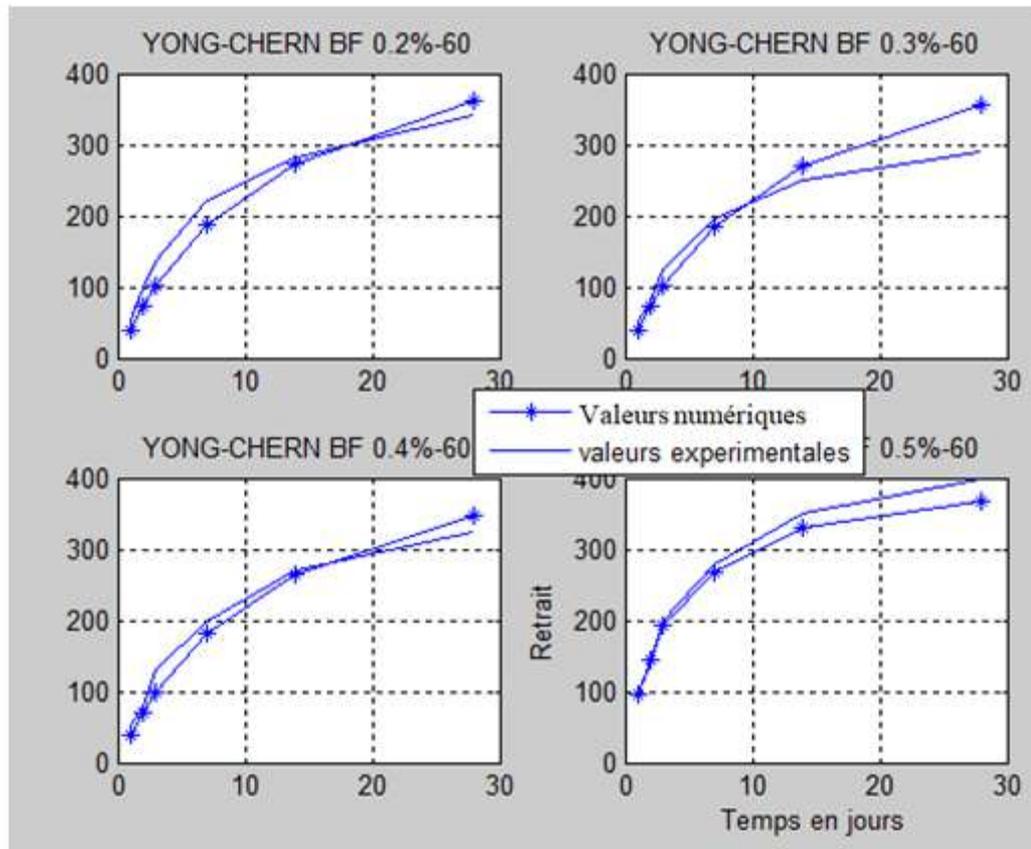


Figure 5-7 : Modélisation de retrait du BF60 de MERKHOUI par l'expression du YOUNG ET CHERN modifiée

Tableau 5-6 : Taux de variation de modélisation de retrait du BF MERKHOUFI par l'expression du YOUNG ET CHERN MODIFIE

Age en jours	TAUX DE VARIATION			
	L=60mm			
	0.5%	0.4%	0.3%	0.2%
1	0.0050	0.2796	0.2512	0.2692
2	0	0.1172	0.0884	0.2552
3	0	0.2419	0.1960	0.2455
7	0	0.0987	0.0573	0.1532
14	0	0.0244	0.0745-	0.0277
28	0	-0.0719	-0.2250	-0.0590

La comparaison entre les courbes théoriques et expérimentales du retrait de béton de fibres de palmier dattier BF60 (figure 5-7) et le tableau5-6, montre que:

- Les courbes numériques ont les mêmes allures que les courbes expérimentales.
- Une excellente convergence pour le BF0.5-60 avec un taux de variation nul.
- Une sous-estimation de retrait aux premiers jours (avant 14 jours)
- Une bonne corrélation est obtenue pour les bétons renforcés par les fibres ayants une longueur de 60mm (un taux de variation n'excède pas 27%).

5-3-5. Résultats et discussions

5-4. Modélisation de fissuration en flexion du béton de fibre de palmier dattier

Les éprouvettes utilisées sont de dimension $10 \times 10 \times 40 \text{cm}^3$, testées après 7, 14 et 28 jours de mûrissement.

L'essai de flexion en quatre points permet d'évaluer les déformations, les contraintes, la flèche, et la propagation de la fissuration sous un chargement continu. (Le protocole expérimental cet essai est le quatrième chapitre.)

La modélisation d'essai de flexion est effectuée par l'ANSYS; Pour créer un modèle d'éléments finis dans ANSYS, il existe plusieurs tâches successives qui doivent être complètes et correctes pour que le modèle s'exécute correctement. Les modèles d'ANSYS peuvent être créés en utilisant l'entrée par des commandes ou par l'interface utilisateur graphique (GUI); Dans notre cas l'interface graphique a été utilisée pour la création du modèle à cause la simplicité, la facilité, et la rapidité.

Dans ce qui suit, nous donnerons les résultats de la modélisation de fissuration en flexion et d'ouverture de fissure du béton de fibres de palmier dattier.

5-4-1.Création du modèle et Discrétisation en éléments finis par ANSYS

Il existe dans l'ANSYS différentes méthodes pour la création d'une forme géométrique. Rappelons que dans notre étude, nous avons utilisés des éprouvettes prismatiques de dimension $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$ (figure 5-8); on ajoute des prismes de repos d'éprouvette, ayant une section carrée de 30mm d'arrêt, et de 100mm de longueur; ces prismes sont des éléments rigides où le module d'élasticité est assez élevé pour éviter toutes déformations de ces éléments au cours du chargement.

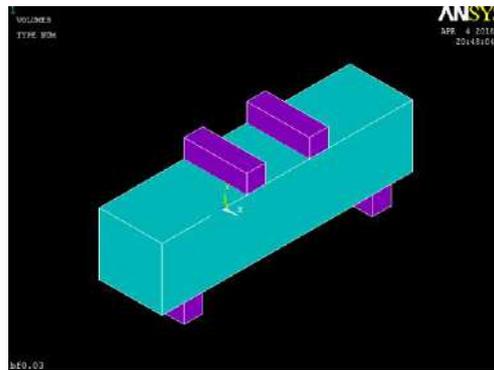


Figure 5-8 : création du modèle

Une analyse par éléments finis nécessite un maillage du modèle (figure 5-9); Il est recommandé d'utiliser un maillage rectangulaire où les dimensions ne dépassent pas le D_{max} des agrégats utilisés [80,83,117], pour cela nous avons choisi un maillage cubique de $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$, les figures 5-9 et 5-10 montrent successivement la discrétisation et le chargement des différents types de béton utilisés.

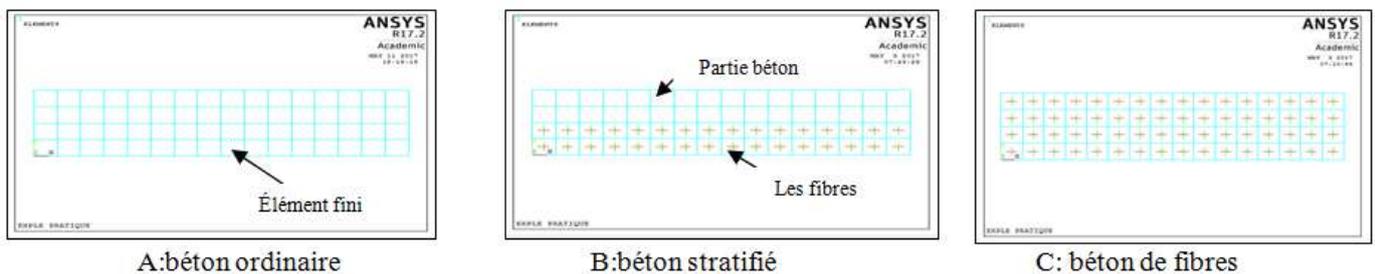


Figure 5-9 : Discrétisation en éléments finis des trois types du béton

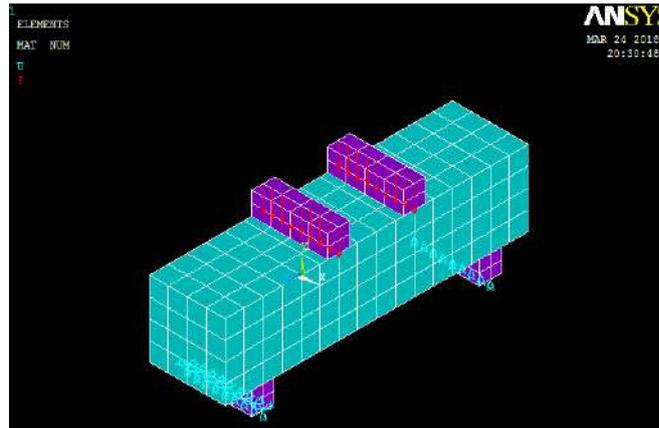


Figure 5-10: Chargement et appuis

5-4-2. Analyse des résultats par ANSYS

L'étape la plus importante est le choix de type d'analyse, pour permettre un affichage correct selon le type désiré: tableau, schéma, graphe....

La commande: '*Solution Control's*' impose l'utilisation d'une solution linéaire ou non linéaire. Généralement, les solides sont considérés comme matériaux à comportement linéaire élastique, mais cette approximation n'est pas justifiée pour des applications techniques avancées. Donc il est nécessaire de prendre en compte le comportement non-linéaire et l'irréversibilité des déformations; .Suivant les notions de base de la résistance des matériaux[118-120], le comportement non linéaire est dû essentiellement à deux types de non-linéarité à savoir : la non linéarité matérielle où les lois constitutives du matériau sont non-linéaires ; et la non-linéarité géométrique où les déplacements ou déformations sont suffisamment importants pour que la configuration initiale ne puisse plus être utilisée valablement pour exprimer l'équilibre et la compatibilité. Pour la théorie des petits déplacements, la non-linéarité géométrique n'est pas considérée. On se limite seulement au non-linéarité matérielle ; .Pour le béton –classique et renforcé- qui est le matériau de base dans notre étude, la non-linéarité matérielle est caractérisée par : la fissuration; les relations contraintes-déformations ; et l'historique du chargement,...

Dans une analyse statique non linéaire, nous utilisons les commandes qui sont présentées dans la figure 5-11 ci-dessous.

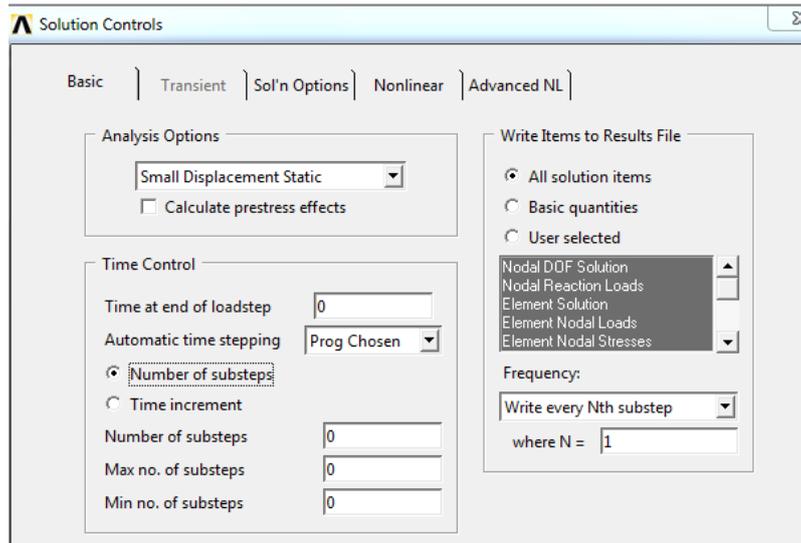
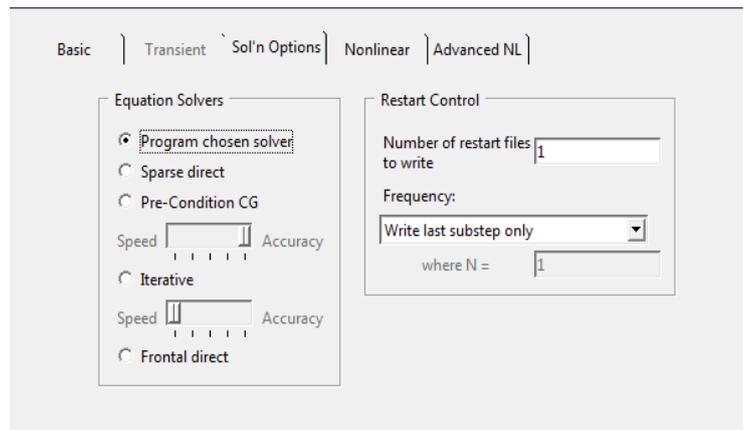
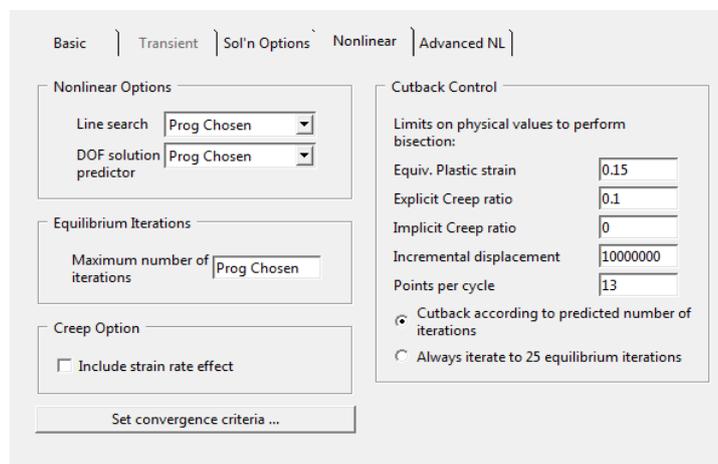


Figure 5-11 : instructions de ‘Solution Control’s’

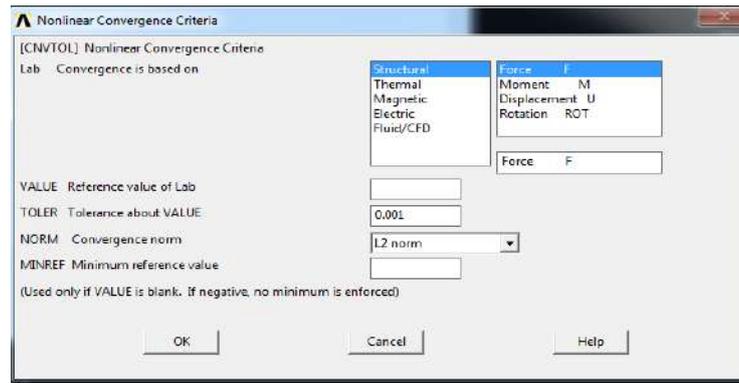
ANSYS considère qu’une solution est convergée, lorsque les critères de convergence sont satisfaits. Les commandes utilisées pour l’algorithme non linéaire, et les critères de convergence sont présentées dans la figure 5-12 (étapes 1 à 3).



Etape1



Etape2



Etape3

Figure 5-12 : Instructions de la convergence

Les valeurs pour les critères de convergence sont définies par défaut, sauf les tolérances de force et de déplacement, sont définies comme 0.5 % fois les valeurs par défaut ; par exemple si on indique 20000 comme valeur typique de la charge et 0.001 comme tolérance, le critère de convergence pour la charge est de 20; rappelons que les unités sont déterminées selon les valeurs désirées au début.

Le comportement du programme lors de la non-convergence pour notre étude a été défini de sorte que le programme se termine mais ne quitte pas.

Dans une analyse non linéaire, la charge totale appliquée à un modèle d'éléments finis est divisée en une série d'incrément de charge appelés (*sub step*). À la fin de chaque solution incrémentale, la matrice de rigidité du modèle est ajustée pour refléter les changements non linéaires de la rigidité structurelle avant de passer à l'augmentation de charge suivante. Le programme ANSYS utilise des itérations d'équilibre de Newton-Raphson pour calculer la rigidité du modèle, ces itérations d'équilibre Newton-Raphson fournissent une convergence à la fin de chaque augmentation de charge dans les limites de tolérance. La figure 5-13 montre l'utilisation de l'approche Newton-Raphson dans une analyse non linéaire.

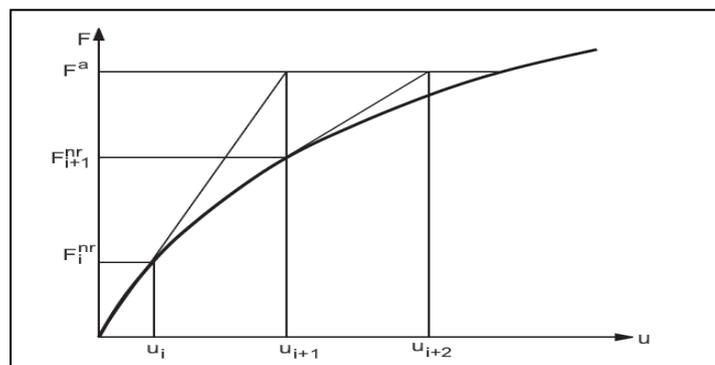


Figure 5-13: Newton-Raphson itérative solution (2 load increments)

Avant chaque solution, l'approche Newton-Raphson évalue le vecteur de charge hors balance, qui est la différence entre les forces de restauration (les charges correspondant aux contraintes de l'élément et les charges appliquées). Par la suite, le programme effectue une solution linéaire, en utilisant les charges hors solution, et vérifie la convergence. Si les critères de convergence ne sont pas satisfaits, le vecteur de charge hors balance est réévalué, la matrice de rigidité est mise à jour et une nouvelle solution est atteinte. Cette procédure itérative se poursuit jusqu'à ce que le problème converge.

Pour l'analyse non linéaire, le passage automatique du temps au programme ANSYS prédit et contrôle la taille des charges. Sur la base de l'historique de la solution précédente, et de la physique des modèles, si le comportement de convergence est lisse, le passage de temps automatique augmentera la charge jusqu'à une taille de charge maximale sélectionnée. Si le comportement de convergence est brusque, le passage de temps automatique fera bissecter l'incrément de charge jusqu'à ce qu'il soit égal à une taille de pas de charge minimale sélectionnée. Les niveaux de charge maximaux et minimaux sont nécessaires pour le passage automatique du temps.

Avant l'affichage des résultats finaux de modélisation, une fenêtre de contrôle est apparue sur l'écran, pour vérifier les principaux datas du modèle (charge max, type d'analyse, et conditions de convergence....) comme indique la figure 5-14

```

SOLUTION OPTIONS
PROBLEM DIMENSIONALITY. . . . .3-D
DEGREES OF FREEDOM. . . . .UX  UY  UZ
ANALYSIS TYPE . . . . .STATIC (STEADY-STATE)
PLASTIC MATERIAL PROPERTIES INCLUDED. . . . .YES
NEWTON-RAPHSON OPTION . . . . .PROGRAM CHOSEN
GLOBALLY ASSEMBLED MATRIX . . . . .SYMMETRIC

LOAD STEP OPTIONS
LOAD STEP NUMBER. . . . .1
TIME AT END OF THE LOAD STEP. . . . .6.0000
NUMBER OF SUBSTEPS. . . . .100
MAXIMUM NUMBER OF EQUILIBRIUM ITERATIONS. . . . .15]
STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS . . . . .NO
TERMINATE ANALYSIS IF NOT CONVERGED . . . . .YES (EXIT)
CONVERGENCE CONTROLS
  LABEL  REFERENCE  TOLERANCE  NORM  MINREF
  U      0.000      0.5000E-01  2     0.000
COPY INTEGRATION POINT VALUES TO NODE . . . . .YES, FOR ELEMENTS WITH
                                                    ACTIVE MAT. NONLINEARITIES
PRINT OUTPUT CONTROLS . . . . .NO PRINTOUT
DATABASE OUTPUT CONTROLS
    
```

Figure 5-14: les instructions de solution options

5-4-3. Affichages des résultats de modélisation de béton de fibre par ANSYS

Dans la phase finale de modélisation, on peut manipuler les résultats d'analyse et les visualiser interactivement ou faire des sauvegardes pour l'impression comme il est représenté dans les figures au-dessous.

Grâce à l'ANSYS, il est possible d'afficher les résultats sous forme tableaux, graphes, ou par une position déformée schématisée sur le modèle (*deformed shap*)

Les résultats de modélisation des différents types du béton (le béton classique BC, le béton de fibre BF) étudiés expérimentalement sont représentés dans les figures ci-dessous.

Dans ce qui suit, tous les valeurs indiquées sont relatifs au nœud inférieur de mi-travée de la poutre, on se base uniquement sur la détermination de la position déformée de la poutre ; la fissuration en flexion, les déplacements, et les contraintes.

A-Position déformé de la poutre

Grâce à cette fenêtre d'affichage (*deformed shap*), nous permis d'avoir une aperçue générale sur la position des poutres, en leur état déformé; c'est une forme graphique uniquement, il est clair que la flexion de la poutre suit une courbure concave du haut vers le bas, selon la direction de la charge appliquée, comme indique les figures 5-15 ci-dessous.

Ces figures correspondant au vingt unième (21ème) pas du chargement, bien sûre, dans les premiers pas du chargement la poutre apparaît droite rectiligne avec une flèche négligeable.

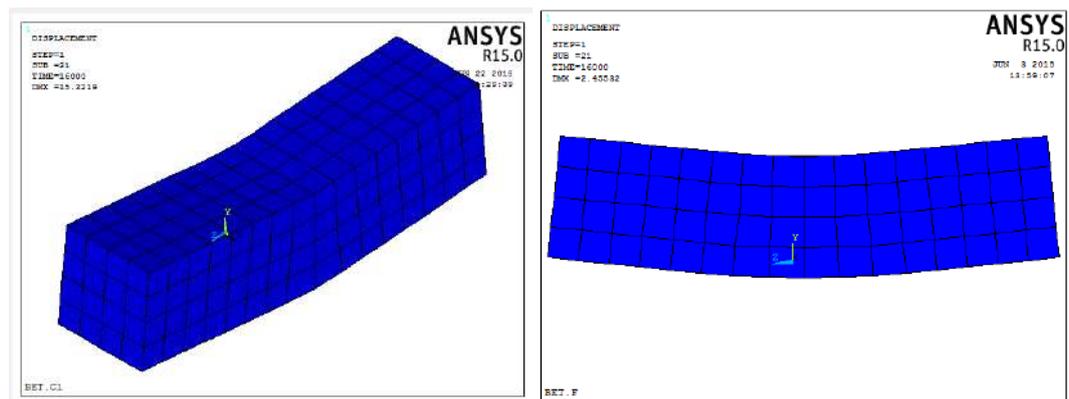


Figure 5-15: Position déformé de la poutre

B- Fissuration en flexion

L'ANSYS, nous permis d'avoir clairement l'apparition de fissuration dans les éléments structuraux.

D'après les figures 5-16 cités au-dessous Nous remarquons:

- Pour tous les taux de chargement le nombre total de fissures est assez important dans le béton classique.
- L'apparition des premières fissures – Traces ou cercles en rouge- dans le béton classique à partir du 15^{ème} step qui correspond un chargement de (3392,667N) avant le béton de fibre, dont la fissuration apparaitre à partir du 17^{ème} step (4059,333N) ; le tableau 4 en annexe donne les valeurs réelles du chargement pour chaque incrément.
- Le béton de fibre à une bonne résistance à la fissuration ; car, pour le step 19 (un chargement de 4726 N) nous observons des fissures secondaires dans le béton classique - trace ou cercles en vert- mais dans le béton de fibre, il n'apparait qu'une continuité des premier fissures.
- L'effet bénéfique pour l'élimination des fissures est clair dans le step 21- correspond à une charge égale à (5333,33N)- car il est remarquable dans l'éprouvette du béton classique un nombre assez important des fissures (préliminaires et secondaires)

Généralement, nous pouvons conclure que les poutres renforcées par les fibres présentent une apparition et une ouverture de fissure plus lente, et moins intensifs que les poutres du béton classique.

Figure 5-16: Fissuration de la poutre

C-Contraintes et déformations

Les déplacements de la poutre pour le dernier step de chargement (21^{ème} pas), selon les trois axes X ; Y et Z sont schématisés dans les figures 5-17 ci-dessous, rappelons que le BET.F indique un béton renforcé par les fibres - donner dans la partie gauche- et le BET. Cl est un béton classique ; d'après ces figures, nous constatons un déplacement vertical max égal à 2.455mm pour le béton de fibre, il est assez faible par rapport le déplacement du béton classique (15.32mm) ; cette dernière observation est en accord avec les observations expérimentales de ABANI S.[2] ainsi que MERKHOUI A. [3], relatif à la mesure de la flèche au milieu d'une poutre en béton de fibre de palmier dattier.

Figure 5-17: Les déformations de la poutre

D-Mesure de la flèche

Concernant la flèche, nous montrons dans les graphes de la figure 5-18 ci-dessous une comparaison entre les mesures expérimentales et les valeurs numériques de la déformation verticale de la poutre (flèche) suivant la charge appliquée, pour les bétons de fibres et les bétons classiques ; nous rappelons que les éprouvettes utilisées ayant des dimensions $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$; Les données de ces graphes et les courbes réelles extraites par ANSYS, sont données respectivement en annexe tableau 04 et figures (29 -30).

D'après les graphes de la figure 5-18; nous constatons que l'allure générale est la même pour les courbes de la prédiction par ANSYS et les courbes expérimentaux, ces derniers sont donnés au chapitre quatre précédent ; cette allure contient deux intervalles principaux : une zone linéaire élastique dans un premier intervalle , et par la suite et dans le cas des chargements assez importants ils présentent des paliers jusqu'à la fissuration, cette observation est coïncide avec les résultats de plusieurs chercheurs [2-4 ; 30 ; 43].

Il faut ajouter que certains chercheurs [4,30] nous montrent que le diagramme flèche-effort des bétons de fibre en flexion comporte quatre zones essentielles que nous avons déjà citées au premier chapitre (figure 1-4): plus les deux zones citées aux dessus, deux autres zones successives sont apparus : une zone de propagation de fissuration suit par une deuxième d'ouverture de la principale macro fissure, selon KRIKER [4] l'effet des fibres est relatif à l'apparition de ces deux dernières zones.

Vu que L'analyse des systèmes non linéaires doit comprendre avant tout le problème physique, et se mettre au courant de diverses stratégies de résolution ; Une stratégie unique ne donnera pas forcément de bons résultats et peut être inefficace pour certains types de problèmes. Il n'existe pas de méthodes directes de résolution de ces systèmes non linéaires. Ces derniers sont solutionnés par la résolution de plusieurs problèmes linéaires successifs où de non linéaire sont respectées pour certaines tolérances, cela est peut-être justifié la présence de seulement les deux

premiers

intervalles

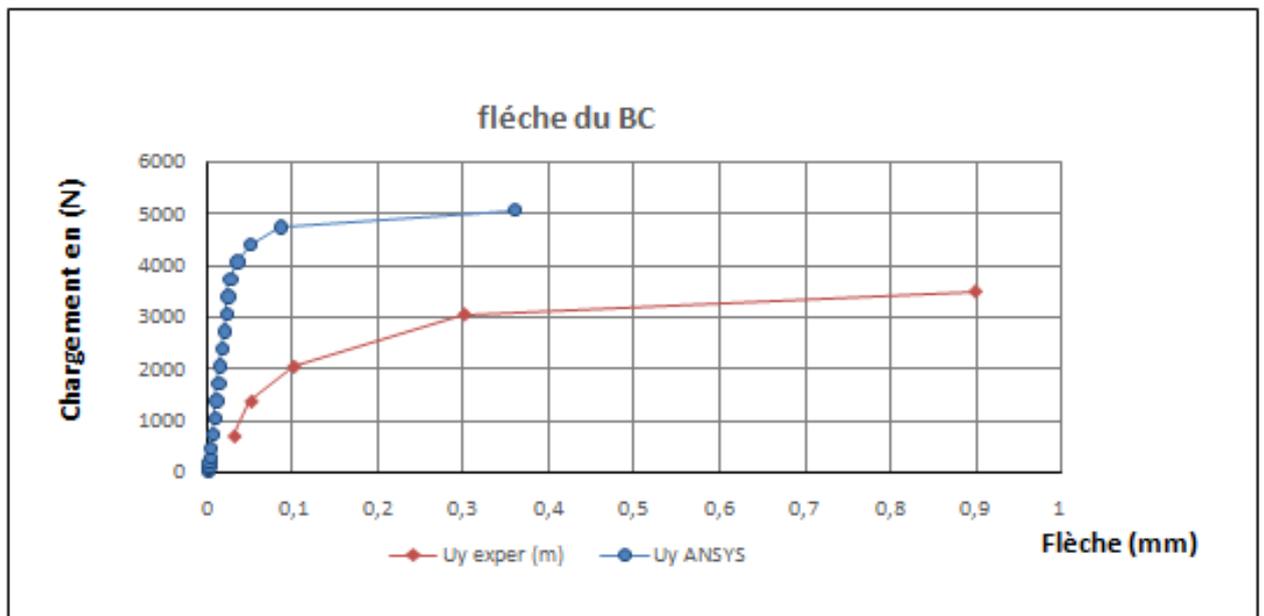
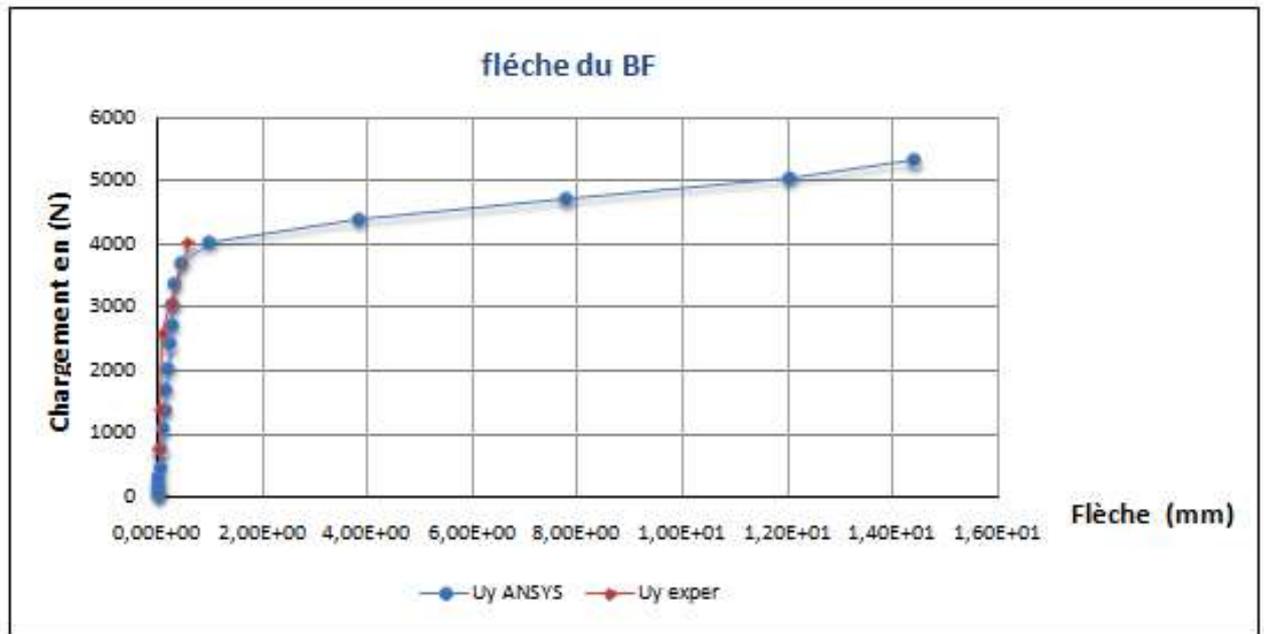


Figure 5-18: courbe charge-flèche du BC et BF

5-6.Conclusion

Les études expérimentales sur les éprouvettes en béton de fibre peuvent être coûteuses et très longues .Néanmoins, la prédiction des phénomènes par des outils informatiques assez poussés offrent des solutions pratiques qui permettraient de gagner du temps et coûts par rapport à un test expérimental réel.

Cette étude visée la démonstration de la capacité d'une approche numérique dans la prédiction de comportement du retrait et de la fissuration en flexion des bétons classiques et renforcés par des fibres de palmier dattier, ainsi que l'ouverture des fissures.

Une prédiction du retrait par les deux modèles HOUARI et de YOUNG ET CHERN a été examinée.la comparaison entre les deux modèles a permis de constater que les déformations calculées par la théorie de HOUARI donnent des résultats légèrement plus élevés que ceux mesurés expérimentalement. Par contre le retrait -à jeune âge- obtenu par la théorie de YOUNG ET CHERN est très proche de celui obtenu par l'expérience; . Il est à mentionner que malgré ces différences les deux modèles proposés donnaient des résultats assez acceptables.

Une deuxième partie de ce chapitre était consacrée à la prédiction de fissuration en flexion par l'utilisation du programme ANSYS. ce dernier était utilisé pour la simulation de fissuration en flexion des trois types d'éprouvettes (en béton classique, béton de fibre et béton stratifié), qui ont déjà été testés dans le laboratoire des matériaux de construction. Les résultats obtenus à partir cette simulation ont été jugés en accord avec ceux obtenus à partir des expérimentations. Les différences entre les résultats se situent dans une plage acceptable.

Conclusion générale

Cette thèse a porté sur l'étude et la modélisation du comportement du béton au phénomène de retrait, et mécanique d'ouverture de fissuration en flexion. L'objectif de ce travail a été de développer des outils informatiques capables de prédire et de comprendre le comportement des structures sous l'effet de ces deux phénomènes, et notamment des structures en zones arides. En effet, un enjeu majeur est actuellement de prévoir le comportement des matériaux composites, afin d'en estimer les valeurs ultimes à long terme. On s'est alors volontairement limité à des actions climatiques qui sont la température et l'humidité relative ambiante. La région d'étude est située dans un climat chaud et sec (une température $T = 30 \pm 5^\circ\text{C}$, et une humidité relative $HR = 32.2 \pm 2\%$).

L'analyse bibliographique, du premier chapitre, a mis en évidence que l'Algérie est parmi les pays qui possèdent une multitude des fibres végétales (fibre de palmier, Alfa, Abaca, chanvre de coton ...), mais sa valorisation dans les domaines pratiques n'est pas encore généralisée. Pour cela, on a pensé à élargir cet axe de recherche par l'utilisation des fibres surfaciques de palmier dattier dans le but d'améliorer les caractéristiques du retrait et d'ouverture de la fissuration.

Parmi les caractéristiques essentielles des fibres extraites des palmiers dattier, on peut noter qu'elles ont une certaine rugosité sur leur surface ce qui leurs assure une bonne adhérence fibres- matrice. Vu ces caractéristiques assez favorables, on constate que le renforcement -par les fibres- des matériaux à base du ciment peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration de leurs propriétés mécaniques et de déformabilité.

D'après les essais expérimentaux effectués sur les bétons de fibres de palmier dattier, on peut conclure que :

- Pour la résistance à la compression, on remarque que cette résistance diminue avec l'incorporation des fibres, et cela est en accord avec la littérature. En effet, la majorité des auteurs rapportent que l'ajout des fibres végétales au béton, ou au mortier n'améliore pas sa résistance à la compression ; Par contre la résistance à la flexion s'améliore avec l'ajout de ces fibres.
- L'utilisation d'un béton stratifié améliore les caractéristiques mécaniques du béton et cela peut être dû à l'augmentation de leur module d'élasticité.
- Le dosage et l'élançement de fibres semblent être les facteurs les plus importants qui diminuent le retrait.
- l'efficacité des fibres apparait au cours des essais de flexion, elles servent d'élément de couture sur les lèvres des fissures, donc leur rôle essentiel est de stopper ou limiter la propagation rapide d'ouverture de fissuration.

D'après la bibliographie, on peut conclure que le comportement de retrait du béton s'avère être compliqué, puisque de nombreux phénomènes et facteurs agissent, de façon plus ou moins couplés, comme : l'hydratation du ciment, l'évaporation d'eau, l'effet de conservation..., ce qui induit des divers types.

Afin de décrire le retrait du béton, on a proposé, deux modèles : l'un basé sur les mécanismes physico-chimiques à l'origine du retrait (composition, dimensions, et conservation), et l'autre basé uniquement sur : l'effet d'éclatement des fibres et le retrait de béton témoin.

La modélisation mise en œuvre sur le retrait - de dessiccation- des bétons de fibre de palmier dattier est basée essentiellement sur l'approche de HOUARI, et du YONG ET CHERN ainsi que ce travail expérimental sur le béton de fibre de palmier dattier, on a apporté des modifications et des améliorations sensibles, afin que ces modèles simulent bien les résultats.

Les modèles développés ont été alors validés par des simulations d'essais expérimentaux sur des éprouvettes d'autres chercheurs : KRIKER et MERKHOUI.

La confrontation des simulations avec les résultats expérimentaux, à l'échelle constitutive du matériau, a montré que le modèle permet d'évaluer la variation du retrait de dessiccation des bétons et des mortiers renforcés par les fibres de palmier dattier.

D'après ces résultats sur la modélisation du retrait, on note la possibilité d'utiliser le modèle de YOUNG et CHERN et le modèle de HOUARI modifié car une bonne corrélation est remarquée entre le modèle et les données expérimentales. Tout en introduisant les facteurs essentiels des bétons de fibre qui sont : le volume V_f , et l'éclatement l/d .

Cependant, on pense qu'il est préférable d'utiliser le modèle qui se base sur la théorie de YOUNG et CHERN parce qu'il ne demande aucune connaissance préalable du retrait du béton témoin ; il suffit de connaître la composition du béton et le mode de conservation, ce qui rend son utilisation plus délicat.

Un deuxième axe très important dans cette thèse est l'étude et modélisation de la fissuration en flexion des structures en béton ; ce dernier phénomène- La fissuration - est l'une des principales causes de déformation et de dommage dans les structures.

La représentation du comportement interne ne peut être abordée que grâce au développement des méthodes numériques. Pour prédire exactement ces comportements, il est préférable d'utiliser la méthode des éléments finis EF qui est certainement la mieux adaptée à la discrétisation d'un ensemble de matériaux à comportement très différents, pour cela un logiciel commercial ANSYS est utilisé pour la modélisation des fissures en flexion basée sur l'approche des éléments finis EF.

Le test de simulation utilisé pour étudier la propagation des fissures est un prisme de béton classique BC, de fibre BF, et stratifié BFS, l'éprouvette est soumise à l'essai de flexion quatre points, une simple rainure est utilisée pour initier les fissures dans le béton. Il en résulte donc une propagation des fissures le long de la frontière de rainure sur lequel, la fissuration a lieu par fractionnement des nœuds.

A la fin de la modélisation de la fissuration en flexion, une comparaison complète est donnée entre les résultats expérimentaux (nos résultats et d'autres existants dans la littérature) et la simulation du test en utilisant l'ANSYS, tout en calculant le déplacement total longitudinal (la flèche) ainsi que le glissement entre les lèvres de la rainure du béton (l'ouverture de la fissuration) pour les différents pas de chargement.

L'application de ces modèles a donné une bonne corrélation entre les données expérimentales et les données modélisées, pour cela nous croyons que notre expérience sur la modélisation constitue alors un pas de recherche dans ce sens de la prédiction de retrait et de fissuration en climat aride.

Perspectives

Au-delà des résultats encourageants qu'on a obtenu, il convient de préciser les perspectives futures, qui permettront de mieux appréhender - dans le futur - le comportement du béton de fibre vis-à-vis le retrait et l'ouverture de fissuration.

Les perspectives se situent, à la fois au niveau de l'expérience, et au niveau de la modélisation.

Du point de vue de la modélisation :

Malgré les résultats acceptables obtenus, on recommande pour ceux qui désirent utiliser ces modèles de prévision du retrait ou de la fissuration, ainsi aux futurs chercheurs ce qui suit :

- Les effets de la réaction d'hydratation n'ont pas été intégrés dans la modélisation du retrait. Il s'agit notamment de prendre en compte son effet sur les phénomènes de retrait, et sur les propriétés mécaniques, essentiellement. Ce travail peut être mené en modélisant tout d'abord le développement de la réaction d'hydratation (en se basant sur la théorie de KEDJOUR ou l'approche de TDC par exemple), afin de connaître l'évolution du degré d'hydratation. Puis, il est nécessaire d'incorporer son effet en proposant de nouvelles lois d'évolutions pour les paramètres du modèle. Ce travail permettra alors d'aboutir à un modèle prédictif complet par l'étude de retrait avant et après la prise.
- Le problème de la localisation des déformations de retrait de dessiccation n'était pas pris en considération ; en effet, si le modèle de HOUARI par exemple, adoptée dans ce travail permet d'obtenir des résultats objectifs vis-à-vis uniquement de la variation de la taille des éprouvettes suivant la durée de vie (en terme de courbe retrait-âge),

mais réellement les mécanismes de retrait ne se produisent qu'au sein de la pâte de ciment. Les effets des granulats ont n'été pas intégrés dans la modélisation en adoptant des paramètres globaux, qui masquent partiellement la physique des phénomènes concernés. Une étude particulière sera alors à mener afin de préciser le comportement à l'interface granulat/pâte de ciment et ses effets à l'échelle de la structure, afin de valider en toute rigueur la démarche adoptée dans ce modèle.

- les simulations de fissuration en flexion sont effectuées en supposant un état vierge de la structure. Or, les effets thermiques et endogènes peuvent induire une fissuration précoce du matériau à l'échelle de l'hétérogénéité ; cet aspect nécessite un traitement numérique et expérimental particulier.
- L'effet des conditions climatiques tels que l'humidité et la température n'a pas été considéré dans la modélisation de fissuration par l'ANSYS, mais ces conditions d'environnement étant variables, et leur prise en compte, dans la modélisation, permettront une prédiction plus complète.

Du point de l'expérimentation :

- L'analyse bibliographique a fait ressortir que les mécanismes à l'origine du retrait au jeune âge, sont aujourd'hui encore mal évalués expérimentalement ; de plus, les résultats expérimentaux sous des déformations de retrait endogène de béton de fibre de palmier dattier à jeune âge ne sont pas disponibles, ou uniquement de façon limitée à notre connaissance. Il est donc nécessaire de poursuivre ce travail par des expériences à jeune âge (et ensuite d'analyse numérique) de ces mécanismes et leurs déformations induites...
- Le béton classique et le béton totalement fibré sont bien détaillés dans ce document, et même dans la littérature, contrairement au béton stratifié, malgré l'amélioration observée sur leur comportement mécanique, ce qui recommande aux futurs chercheurs de compléter cette démarche de recherche par le positionnement de l'axe neutre et d'étude le comportement rhéologique de ce type du béton.
- Intensifier les efforts pour des études complémentaires avec une grande précision, sur les paramètres influençant sur le retrait des bétons de fibre de palmier dattier en zone aride, afin d'avoir une bonne modélisation des résultats, comme l'effet des dimensions d'éprouvette.

Enfin, on espère que ces résultats obtenus soient susceptibles d'estimer le retrait et la fissuration des bétons et des mortiers de fibre de palmier à partir de la connaissance des données de base, et que ce travail contribuera à l'élargissement du champ d'utilisation des bétons et mortiers de fibres de palmier dattier dans le domaine de la construction.

- [1] MANI A. " Etude comparative de béton tendu fissuré dans les éléments fléchis en béton armé " mémoire de Magister, Université de Tizi Ouzou, 2014, PP101.
- [2] ABANI S. "Caractérisation et durabilité des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier "mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2003, PP67.
- [3] MERKHOUFI A. " Contribution à l'étude des propriétés et déformations du béton renforcé par les fibres du palmier dattier en climat sec et chaud " mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2004, PP69.
- [4] KRIKER A. "Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec", Thèse de Doctorat, ENP, 2005, PP166.
- [5] KHALOO, A. R. and KIM, N., " Mechanical properties of normal to high- strength steel fiber-reinforced concrete ", Cement, concrete and aggregates, vol.18, N°2, pp.92-97, 1996.
- [6] SWAMY, R.N., " Properties of high-strength concrete " , Cement, concrete and aggregates, Vol.8, N°1, pp.33-41, 1986
- [7] AFGC, "Ultra high performance fiber -reinforced concretes ", SETRA, Janvier 2002.
- [8] BLEDZKI, A.K. and GASSAN J., "Composite reinforced with cellulose based fibers", Progress in polymère science, pp.221-274, 1999.
- [9] DJOUDI A. "Caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leurs renforcements par les fibres végétales du palmier dattier", Mémoire de Magister, C.U Laghouat, 2001.
- [10] HOLMER S., VAHAN A. "Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites ", Cement and concrete composites 21, 1999, 49-57
- [11] COOK D.J., "Concrete and cement composites reinforced with natural fibres", proc. Symp. On fibrous concrete, Construction press LTD, Lancaster, pp. 99-114, April. 1980.

- [12] NILSON, L., "Reinforced concrete with sisal and other vegetable fibers", Swedish council for building research, document d 14, 1975.
- [13] AYYAR, T.S.R., and MIRIHAGALLA, P.K., "Elephant grass fibres as reinforcing fiber", magazine of concrete research, vol.28, N°96, pp. 162-167, September 1976.
- [14] COUTTS, R.S.P., "Flax fiber as a reinforcement in cement mortar", the international journal of cement composites and lightweight concrete, vol.5, N°4, pp. 257-262, August 1983.
- [15] KRIKER A., BALI A., DEBICKI G., KHENFER M.M., "Amélioration de la durabilité des matériaux cimentaires en environnement chaud et sec par valorisation des fibre végétales et sous produits industriel locaux", Congrès international : réhabilitation de construction et développement durable, Alger, 3-4 Mai 2005.
- [16] SWAMY. R. N, MANGAT. P. S. "Influence of fiber geometries on the properties of steel reinforced concrete" ELSEVIER. Cement and concrete composites, volume 4, N° 3, 1974.
- [17] AZIZ, M.A., PARAMASIVAM, P. and LEE, S.L., "Prospect for national fiber reinforced concretes in construction" , The international journal of cement composites and light weight concrete, vol.3, N°2, May 1981.
- [18] KRIKER A., DEBICKI G., BALI A., KHENFER M.M., CHABANNET M., "Valorization of date palm fibers in reinforcement of concrete at hot dry climate", pp20 –22 Sept. Vienna , ITALY 2004.
- [19] SCHRADER. E. K "Le béton armé de fibre " Comité des Etats-Unis, 1982
- [20] LARRARD F., "Construire en béton: l'essentiel sur les matériaux", LCPC, Paris 2002.
- [21] MOKHTARI A. KRIKER A. GUEMMOULA Y. BOUKRIOUA A. KHENFER M.M. "Formulation and Characterization of Date Palm Fibers Mortar by Addition of Crushed Dune Sand" ;International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES2016
- [22] H. SAMOUH1, E. ROZIÈRE1, A. LOUKILI," Interprétation des mesures du retrait de

- dessiccation des bétons autoplaçants (BAP)". XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012 pp101
- [23] ROMUALDI J P, BATSON G B., "Mechanics of crack arrest in concrete", Proceeding of American Society of Civil Engineers, Vol.89, pp147- 168. (1963)
- [24] ROSSI P, ACKER P, MALIER Y., "Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure", Materials and Structures, vol. 20, pp436-439. (1987)
- [25] GUERMITI L. " contribution a l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques ", mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2013
- [26] ACI 544, "State of the-art: report on fiber reinforced concrete", journal American, Concrete Institute. U.S.A, Proc. Vol. 70, n° 11 pp. 729-744. (1973),
- [27] BEN YAHIA A., "l'Influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique du béton", Mémoire de magister, université de M'sila, Algérie. (2001)
- [28] BENTALHA M, HOUARI H., "Étude du comportement des matrices cimentaires renforcées de fibres métalliques sous chargement monotone croissant", Sciences technologie, B – N°25, pp51-58. (2007)
- [29] REHSI, S.S., " Use of natural fiber reinforced cement and concrete", Edited by R.N Swamy and Glasgow, BLACKIE and SON LTD, vol. 5 pp. 243-255, 1988.
- [30] RAMASWAMY, R.N,AHUJAT, B..M. and KRISHAMOORTHY S., "Behavior of concrete reinforced whit Jute coir and Bamboo fibers ", The international journal of cement composites and lightweight concrete, Vol.5, N°1,February 1983.
- [31] ZOLLO.O.R.F., ILTER.J.A ET BOUCHCOURT G.B., "Plastic and drying shrinkage in concrete containing collated fibrillated polypropylene fiber developments in fiber reinforced cement and concrete Rilem Symposium." , RILEM Technical committee, vol.1, pp. 4-5, 1986.
- [32] SOROKA I.,. "Concrete In Hot Environments", Edition E & FN SPON, London, 1993.

- [33] ALEKRISH A.A. and ALSAYED S.H., "Shrinkage of fiber and reinforced fiber concrete beams in hot dry climate ", Cement and Concrete composites 16, pp.229-307.1994.
- [34] KEDJOUR NE. , "Propriétés et pathologie du béton", Office de publications universitaires ALGER 1993 PP275(129)
- [35] ADAM M.NEVILLE, "Propriétés des bétons", CRIB. édition EYROLLES, Septembre 2000.
- [36] HOUARI H., "Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métallique soumis a l'action des charges maintenues et cycliques", Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, pp 224, 1993
- [37] HOUGET V. "Etude des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de composites ciments-fibres organiques", Thèse de doctorat, INSA, Lyon , 1992.
- [38] BYOUNGGEON K. JASON W. W. "Using acoustic emission of quantify damage in restrained fiber-reinforced cement mortars", Cement and Concrete Research 2208, vol. 8, Aout 2002.
- [39] ABDOU K., HOUARI H., (2009), 'Influence des fibres d'acier sur les variations dimensionnelles et pondérales des matrices cimentaires', Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université de Constantine, Algérie, p9.
- [40] BARR B., HOSEINIAN S.B. and BEYGI M.A., "Shrinkage Of Concrete Stored In Natural Environment", Cement And Concrete Composites,25 ,pp.19-29, 2003.
- [41] PITRO L. , KLAAS V. B., IPPEI M. , " Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high – performance concrete ", Cement And Concrete 31,pp 1867-1872(2001).
- [42] A.BELFERAG A. "Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes", Thèse de doctorat, université de BISKRA, pp 144, 2016.
- [43] MOKHTARI A. "Contribution A L'étude De La Durabilité Des Mortiers Renforcés Par Des Fibres De Palmier Dattier ", Thèse de doctorat, université de Ouargla, pp 115, 2017

- [44] DANIEL MONTHARRY, MICHELPLATZER "La technique du bâtiment tous corps d'état Relié", Éditions du Moniteur, 2014
- [45] BENBOUDJEMA F. " modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations bi-axiales. application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires" ; thèse de doctorat ; pp 258 ; université de MARNE LA VALLEE;2002
- [46] CATED; " Fissuration " ; Guide Des Techniques Du Bâtiment, Synthèse 1999
- [47] ACI 201.1R-92 "Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service ", 1992.
- [48] M.S.SUMPTER, "Behavior of high performance steels as shear reinforcement for concrete beams", Thèse de doctorat, université de NCS , Civil Engineering, Raleigh, NC, 2007.
- [49] N. MAKHLOUF "Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux" ; mémoire de magister ; université Mouloud Mammamri TIZIOUZOU 2010
- [50] KHELOUI TAOUCHE F. "Modélisation du comportement à la fatigue d'éléments de construction en béton de fibres" ; Thèse de doctorat, Université de Tizi Ouzou, P 34, 2012.
- [51] M. CHEMROUK. « Notions avancées de béton structural ». Post-Graduation, USTHB, 2002
- [52] CEB; "Durable concrète structures ", Bulletin d'information N°183, 1992
- [53] C.J CHEETHAM, et P.MAGUIRE, "Coating of glass fibers" , U.S.Patent 4, 173, 486,1979.
- [54] TAHENNI T. "Fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute performance" mémoire de magistère, USTHB 2006
- [55] ANDONIAN, R., MAI, Y.W. and COTTERELL B., "Strength and fracture properties of cellulose fibres reinforced cement composites", The International Journal of Cement Composites, Vol. 1 N° 3, pp. 151-158, 1979.

- [56] KHENFER, M.M., BALI A and MORLIER, P., “ The effect of water and fibre length on the fracture résistance of cellulosic fibre cement”, *Concrète Science and Engineering*, Vol. 2, pp; 56-62, March 2000.
- [57] BALUCH, H., ZIRABA, Y.N. and AZAD, A., “Fracture Characteristics of Sisal Fibre Reinforced Concrete”, *The International Journal of cement Composites and Light weight Concrete*, Vol. 9, N°3, August 1987.
- [58] FRITIH Y., “Apport d’un renfort de fibres sur le comportement d’éléments en béton autoplaçant armé”, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France. (2009)
- [59] B. BELATTAR ; “Modélisation & Simulation sur Ordinateur”, Université de Batna 2004 pp27
- [60] HAFSI A.L, “contribution à la modélisation numérique et expérimentales du gonflement des argiles non saturée, application aux argiles d’In Aménas et Touggourt ”, Thèse de magister ENTP Alger, 1996
- [61] ZIA P., WHITE R. N., DAVID A. VANHORN, “principles of model analysis”, *models for concrete structures*
- [62] MAZARS J., “Nouveaux concepts dans la modélisation du comportement du béton composite : application au calcul des structures.” , *ANNALES du ITBTP*, N°461, série béton 252, Janvier 1988.
- [63] CTC Centre, “Modélisation numérique en structures et géomatériaux”, *La lettre: Revue algérienne*, N° 26, Avril 2001.
- [64] AKCHICHE H. , KRIKER A.; “Shrinkage Modeling Of Concrete Reinforced By Palm Fibres In Hot Dry Environments”; *TMREES, FRANCE* 2016
- [65] BOINET J., “Prévision du module élastique des matériaux poreux : Influence des interactions”, *ANNALES du ITBTP*, N°461, Série matériaux 72, Octobre 1989.
- [66] BOINET J., “Modélisation des matériaux composites par la méthode des éléments finis : déduction des relatives équivalentes des inclusions dans le cas des bétons ”, *ANNALES du*

ITBTP, N°489, Décembre 1990.

- [67] ROSSI P. "une modélisation numérique de la fissuration des structures en béton fibré", Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées- 216- JUILLET-AOUT 1998-Réf.4196-PP.41-48
- [68] DIPRICO M., FELICETTI R., PLIZZARI G.A., "Fibre reinforced concrètes", RILEM, Italy , 20-22 Septembre 2004.
- [69] VANDEWALLE L., "Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions", ELSEVIER, Cement, concrete composites 22, pp201-208, 2000.
- [70] LOUKILI A., CHOPIN D., KHELIDI A. TOUZO J. Y., "A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history", Cement and concrete research, vol. 30, pp. 915-922, 2000.
- [71] FERON C., "Etude des mécanismes de génération contraintes et de fissuration par retrait gêne dans les structures a base se matériaux cimentaires", Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2002.
- [72] BENAÏSSA A., VIGUIER C., "Estimation de la compatibilité des résultats réglementaires et expérimentaux : retrait et fluage du béton de sable", Equipement : Revue technique de l'école nationale des travaux publics, Algérie, N° 8, Avril 1993.
- [73] BISSOCHOP J., SHIOTANI T., and VAN MIER J.G.M., "Evaluation of shrinkage micro-cracking in concrete", Cement and concrete research, 2003 article in press.
- [74] BISSOCHOP J. and VAN MIER J.G.M., " How to study drying shrinkage micro-cracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy ", Cement and concrete research , vol.32, pp.279-287, 2002.
- [75] JOHN E., BOLANDER JR, J. E., and BERTON, S., "Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays ", Cement and concrete , composites, article in press, 2003
- [76] KOENDERS E.A.B. and VAN BREUGEL K., "Numerical modeling of autogenous shrinkage of hardening cement paste ", PERGAMON, Cement and concrete research, vol. 27, N°10 pp.

1489-1499, 1997.

- [77] HIMA N. "Contribution à la modélisation des bétons renforcés par des fibres de palmier dattier en flexion ", mémoire de magister, Université de Ouargla, 2010
- [78] SWAMY, R.N., "New reinforced concrete", Concrete Technology and design, Vol. 2,1984.
- [79] BANTHIA et SHENG. "Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites", cement and concrete, 18(1996) pp257-258-267.
- [80] ANSYS 8.0. "The general purpose of finite element software". .htt://ansys.epfl.ch/EF.html
- [81] LIU, G. R., & QUEK, S. S., "The Finite Element Method", A Practical Course. Oxford: Butterworth-Heinemann. (2003)
- [82] MERABET W., "Modélisation du comportement des poutres Apres fissuration : tension stiffening effect ", mémoire de magister ;université Mentouri ;Constantine.
- [83] ANSYS, Mechanical ,APDL, Element Reference release15.0 (2013)
- [84] احمد امين الهيتي ومحمد طارق الاجبارية " دراسة انهيارات و تشققات الابنية المنفذة على التراب الطينية و طرق تدعيمها " المجلة العراقية للهندسة المدنية , 2007
- [85] KAOUANE M. " analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé : l'effet thermomecanique" ; mémoire de Magister. pp177 ; université Mouloud Mamamri TIZIOUZOU 2010
- [86] MAZARS J "Nouveau concept dans la modélisation du comportement du béton composites : application au calcul des structures" ; ANNALES du LTBTP N°461, série béton 252, Janvier 1988
- [87] FREDERIC - DUFOUR " contributions a la modélisation numérique de la fissuration des structures en béton avec prise en compte du fluage et estimation de la perméabilité " mémoire d'habilitation à diriger des recherches, l'Ecole Centrale de Nantes, 2008, PP88.

- [88] TOUHARI M., MITICHE-KETTAB R., ABDESSEMED M., BALI A. ; " Renforcement Des Poutres par Matériaux Composites A Base Des Fibres De Carbone 'CFRP' " ; Séminaire National sur :Les Matériaux Locaux dans la Construction ; U Ouargla 2012
- [89] - اكرام فرعون الملا استخدام الالياف المصنعة لتسليح الخرسانة في الاجزاء غير المعرضة للاحمال الانشائية كلية الهندسة - جامعة بغداد
- [90] K.OUCHENANE, R.LASSOUED, M.OUCHENANE ; " Approche Numérique De L'effet De Fissuration Sur L'adhérence Acier Béton" ; Colloque National : Pathologie des Constructions : Du Diagnostic à la Réparation Département de Génie Civil ; Université Mentouri Constantine - 25 et 26 Novembre 2008
- [91] BOUZOUAYED S. "Contribution à la modélisation numérique des bétons de fibre en flexion "thèse de Doctorat, Université de Ouargla, 2017, PP151.
- [92] MELHEM E.; "Reasons of cracks in reinforced concrete structures, methods of repair"; Tishreen University. Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol . (37) No. (2) 2015 Syria.pp146
- [93] J. MICHELS, D. WALDMANN, S. MAAS, A. ZÜRBES . " Capacité portante de planchers-dalles en béton de fibres » Université du Luxembourg, Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication / 6, rue Coudenhove-Kalergi L-1359 Luxembourg-Ville (L)
- [94] JACOBS.J., VYNCKE J. " Pathologie du Béton Comment y Faire face ? ". CSTC-Magazine, Belgium, 1993, p.37-45.
- [95] NF P 18-301. Normes française, "Granulats" Granulats naturels pour bétons hydrauliques Homologuée, décembre 1983.
- [96] NF P 18-101. Normes française "Granulats" Définitions et classifications. Expérimentale .décembre 1990.
- [97] NF P 18-598. Normes française « Equivalent de sable». October 1991

- [98] NF P 18-555. Normes française «Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables ». Décembre 1990.
- [99] NF P 18-560. Norme française « Analyse granulométrique ». Septembre 1990.
- [100] NF P 18-591, Norme française "Granulats- Détermination de la propriété superficielle" Septembre 1990
- [101] NF P 18-573, Norme française “ Granulats : Essai Los Angeles”. Décembre 1990
- [102] NF P 18-572, Norme française” Granulats Essai d'usure micro-Deval » Décembre 1990
- [103] NF P 94-068, Norme française “Sols: Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux”. Octobre 1998
- [104] DUPAIN, R., LANCHON, R., SAINT ARROMAN, J.C., 2000 . " Granulats, sols, ciments et bétons - caractérisation des matériaux de génie civil par les essais laboratoire", 2nd ed. Asteilla, Paris. 240p.
- [105] GORISSE.F. " Essais et Contrôle des bétons". Édition EYROLLES, vol 2000, Paris ,1978.
- [106] Norme Européenne NF EN ISO 12390-4 Essais pour béton durci -Partie 4 :Résistance en Compression - Caractéristiques des machines d'essai. AFNOR, France, 2000. p. 19.
- [107] NFP 18-407, “Béton avec fibres métalliques- Essai de Flexion”, AFNOR, France, p.8, 1981.
- [108] NFP 18-409, “Béton avec fibres métalliques- Essai de Flexion”, AFNOR, France, p.8, 1993
- [109] ACI Committee 224 , "Causes ,Evaluation and Repair of Cracks" ACI 224 r -01 'ACI Manual of

Concrete Practice 2004 ,Michigan, USA

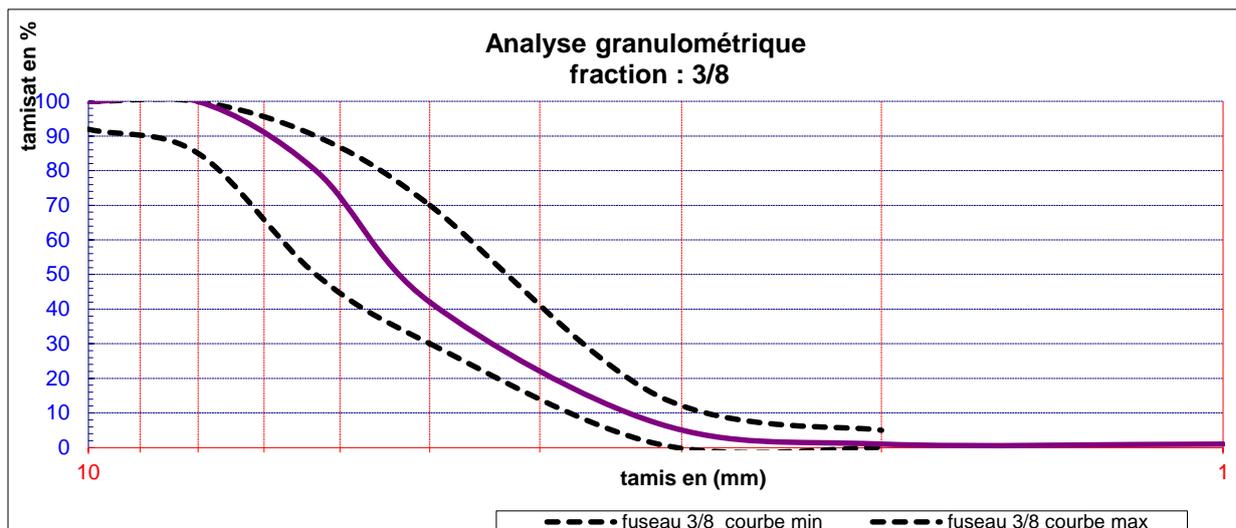
- [110] NF P15-433.Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement.Février 1994.
- [111] AKCHICHE H. ; " Contribution à la modélisation du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier en régions désertiques" ; mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2006, PP122.
- [112] AKCHICHE H.;KRIKER A. ; " modélisation du retrait de béton de fibres de palmier dattier " ; Séminaire National sur Les Matériaux Locaux dans la Construction ; U Ouargla, 2012
- [113] ROSSI P. "les bétons de fibres métalliques "presse ENPC,France V.309, 1998.
- [114] JOHN E.,BOLANDER JR, J. E., and BERTON, S., "Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays ", Cement and concrete , composites, article in press, 2003
- [115] FLORENT KR ZAKA; " la Première pas en Matlab "; Lab P.C.T., UMR CNRS 7083, Paris, France 2015
- [116] <http://fr.mathworks.com/>
- [117] GOUDJIL Sofiane ; " Modélisation numérique de fissuration en flexion des bétons renforcés" ; mémoire de Master, Université de Ouargla, 2016.
- [118] BALUCH H., ZIRABA Y.N. , AZAD A.K., "fracture characteristic of sisal fibre reinforced concrete", The international journal of cement composite and lightweight concrete, vol.9, N° 8, October 1987
- [119] AGATI P., LEROUGE F., MARC R." Résistance des matériaux" , France 2008 , pp502
- [120] JEAN-CHARL C "Modélisation des structures- Calcul par éléments finis", DUNOD 2001



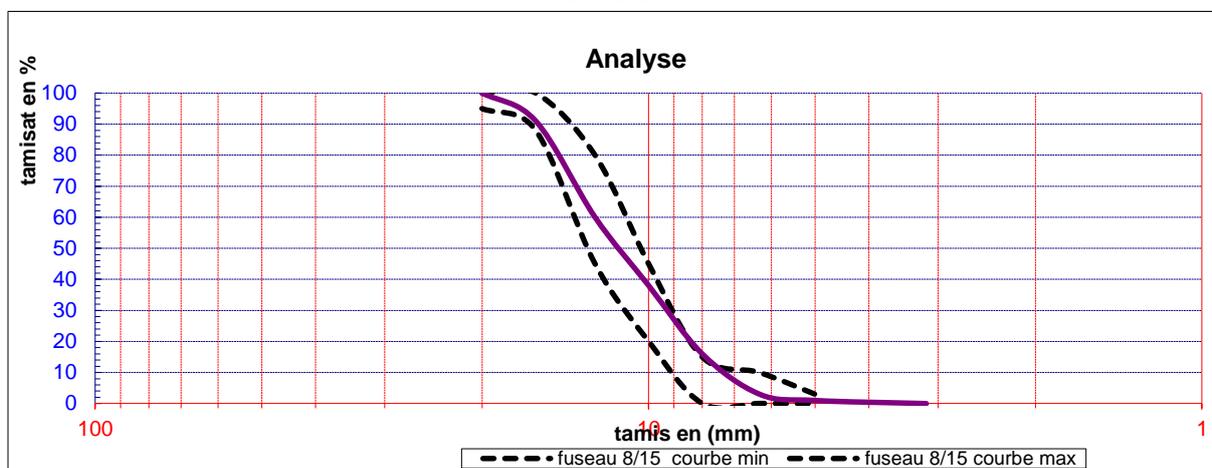
Figure 01 : Analyse granulométrique par tamisage

Tableau 01 : Analyse granulométrique du sable

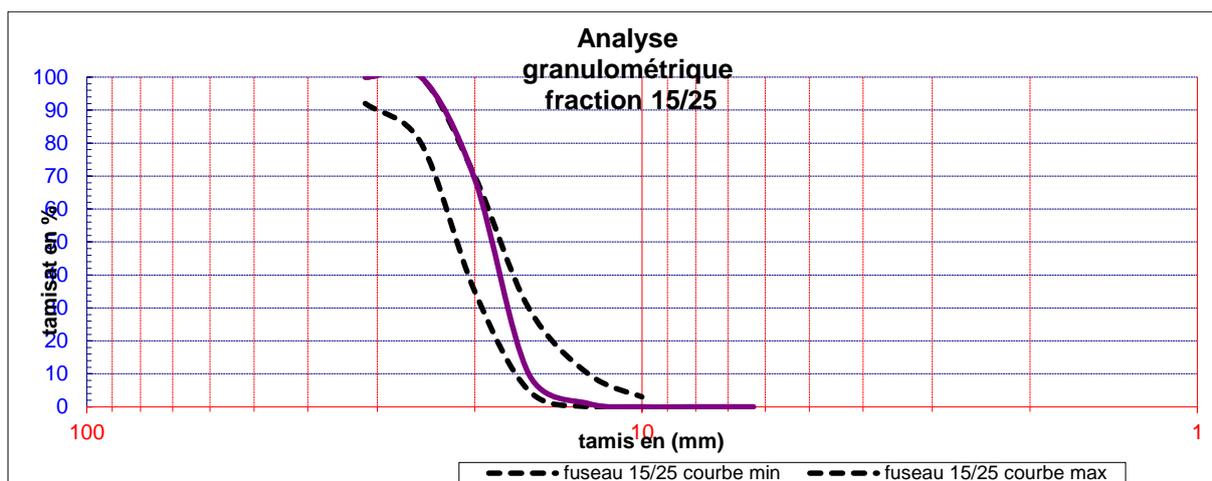
Echantillon : Sable 0/5			
Masse de l'échantillon =1000g			
Tamis	Refus cumulé	Pourcentage refus	Pourcentage passant
12.5	0.00	0.00	100
10	24.25	2.42	98
8	31.30	3.13	97
6.3	37.65	3.76	96
5	48.15	4.81	95
2.5	116.07	11.60	88
1.25	257.85	25.78	74
0.63	648.28	64.82	35
0.315	920.39	92.04	8
0.160	981.48	98.15	2
0.08	998.96	99.89	0



A : fraction 3/8



B : fraction 8/15



C : fraction 15/25

Figure 02 Analyse granulométrique par tamisage du gravier

(A : fraction 3/8, B : fraction 8/15, C : fraction 15/25)



a: masse volumique Absolue

b : masse volumique Apparente

Figure 03 : masses volumiques du sable



a: Masse Volumique Absolue

b Masse Volumique Apparente

Figure 04: masses volumiques du gravier



Figure 05 : Essai d'absorption d'eau pour les sables



Figure 06 : Essai de l'équivalent de sable.



Figure 07: Essai du bleu de méthylène



Figure 08 : Absorption d'eau pour les trois fractions de gravier



Figure 09: Analyse chimique de ciment



Figure 10: Dureté par Los Angeles



Figure 11: Micro Deval



Figure12 : Fibres de palmier dattiers individuels et sous forme d'une plaque naturel



Figure13 : Traction des Fibres de palmier dattiers individuels



a/ béton classique

b/ béton de fibre

Figure 14 : malaxage et Mesure de la consistance (Affaissement au cône d'ABRAMS)



A : béton stratifié

B : béton classique

C : béton de fibre

Figure 15 : éprouvettes et différents sections du béton



Figure 16 : Presse du béton CONTROLS



Figure 17 : Echantillon après l'écrasement



Figure 18 : appareil de flexion CONTROLS



Figure 19 : Mesure de la flèche



A/ appareillage de mesure



B/mesure : sens horizontal



C/mesure : sens vertical

Figure 20 : Essais d'auscultation dynamique



Figure 20 : Essais de retrait

Tableau 02 : Résultats de MERKHOUI d'analyse granulométrique du sable

نسبة المار المجمع (%)	نسبة المتبقي المجمع (%)	المتبقي المجمع (غ)	المتبقي الجزئي (غ)	فتحة الغربال (مم)
99.75	0.25	5.00	5.00	5
95.25	4.75	95.00	90.00	2.5
79.00	21.00	420.00	325.00	1.25
37.50	62.50	1250.00	830.00	0.63
9.25	90.75	1815.00	565.00	0.315
1.75	98.25	1965.00	150.00	0.16
0.50	99.50	1990.00	25.00	0.08
0.00	100.00	2000.00	10.00	القاع

Tableau 03 : Résultats de MERKHOUI d'analyse granulométrique du gravier

نسبة المار المجمع (%)	نسبة المتبقي المجمع (%)	المتبقي المجمع (غ)	المتبقي الجزئي (غ)	فتحة الغربال (مم)
96.63	3.38	135.00	135.00	16.0
85.88	14.13	565.00	430.00	12.5
71.75	28.25	1130.00	565.00	10.0
13.63	86.38	3455.00	2325.00	8.0
1.63	98.38	3935.00	480.00	6.3
0.38	99.63	3985.00	50.00	5.0
0.00	100.00	4000.00	15.00	لقاع

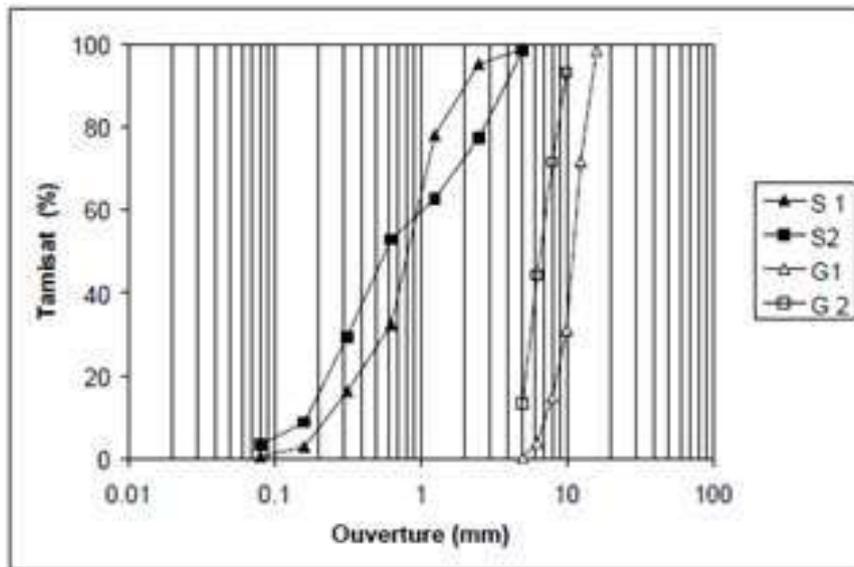


Figure 21 : Résultats de KRIKER d'analyse granulométrique



Figure 31 : presse universelle INSTRON d'essai de flexion[4]