



Université KASDI Merbah de Ouargla

Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur
Département d'hydraulique et Génie Civil

N° d'ordre :

N° de série :

Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de :

MAGISTER

Filière : **Aménagement Hydraulique et Génie Civil**

Option : **Génie Civil**

Par :

AKCHICHE Hamida

Thème

**Contribution à la modélisation du retrait
et du fluage des bétons et mortiers renforcés par
des fibres de palmier dattier en régions désertiques**

Soutenu publiquement le : 16/05/2007

Devant le Jury composé de :

BEBBA Ahamed Abdelhafid	Maître de Conférence	U. de Ouargla	Président
BOUHICHA Mohamed	Professeur	U. de Laghouat	Examineur
BENTEBBA Mohamed Tahar	Maître de Conférence	U. de Ouargla	Examineur
KRIKER Abdelouahed	Maître de Conférence	U. de Ouargla	Promoteur
CHACHA Djamel	Maître de Conférence	U. de Ouargla	Co-Promoteur
HAFSI Abdellatif	Maître de Conférence Associé	LTPS Ouargla	Invité

REMERCIEMENTS

A l'occasion de la présentation ce modeste travail qui a été réalisé au sein de l'université de Ouargla, nous tenons à dresser nos vives reconnaissances et nos sincères remerciements à :

*Mr : **KRIKER Abdelouahed** (M.C) d'avoir bien accepté de m'encadrer et de me guider durant le déroulement de ce travail, et à Mr : **CHACHA Djamel** (M.C) pour son aide précieuse et ses encouragements.*

*Mes vifs remerciements à Monsieur **BEBBA Ahmed Abdelhafid** pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail et de présider le jury d'examen.*

*Je tiens à remercier Monsieur **BOUHICHA Mohamed** , Monsieur **BENTEBBA M. Tahar** et, Monsieur **HAFSI Abdellatif** pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail et de faire partie du jury de soutenance.*

*Mes vifs remerciements à tous les enseignants qui ont participé dans notre formation du primaire, jusqu'à l'université, **Merci infiniment.***

DÉDICACE

Je dédie cette Thèse de Magistère à :

*Mes très chers parents pour
Leurs sacrifices, leurs patiences, et leurs
Encouragements tout le long de ma
formation,*

Mon marie Abderrahmane

*Mes frères et mes sœurs chacun par son
nom,*

*Ma famille AKCHICHE et ma belle-
famille KEBALI-BENAI,*

*Mes amies et mes camarades,
Mes enseignants et mes collègues d'étude.*

Merci du fond du cœur

HAMIDA

SOMMAIRE

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

Introduction	1
---------------------------	----------

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

1-1. Introduction	3
1-2. Définition d'un matériau composite	3
1-3. Historique et perspective de l'utilisation des fibres	4
1-4. Types des fibres utilisées dans le domaine de construction	5
1-5. Les fibres végétales	7
1-5-1. Introduction	7
1-5-2. Classification des fibres végétales	7
1-5-3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales	8
1-5-4. Les fibres de palmier dattier	9
1-6. Domaines d'application des fibres	10
1-7. Les bétons de fibres	11
1-8. Conclusion	12

CHAPITRE 2 : Généralités sur le retrait et le fluage des bétons

2-1. Introduction	13
2-2. Le retrait	13
2-2-1. Définition	13
2-2-2. Causes de retrait du béton	13
2-2-3. Types de retrait	14
2-2-4. Facteurs influençant sur le retrait d'un béton de fibre.	16
2-2-5. Autre paramètres d'influence	22
2-3. Le fluage.....	24
2-3-1. Définition	24
2-3-2. Facteurs influençant sur le fluage.....	26
2-3-3. Autre paramètres d'influence	30
2-4. Conclusion	32

CHAPITRE 3 : Généralités sur la modélisation des retraits et fluages des bétons

3-1. Introduction	34
3-2. Définitions	35
3-2-1. Le modèle	35

3-2-2. Etapes de construction du modèle	35
3-2-3. La modélisation	35
3-3. Modélisation du retrait	37
3-3-1. Introduction.....	37
3-3-2. Modélisation du retrait d'un béton classique.....	37
3-3-2-1. Forme analytique du retrait suivant la théorie de KEDJOUR	37
3-3-2-2. Prévision du ACI 209R-92	40
3-3-2-3. Le modèle BP (Bazant et Pannula)	41
3-3-2-4. Les modèles Eurocode2 (EC2) et le modèle B3 du ACI 209	44
3-3-2-5. Approche de détermination du retrait d'un mortier	48
3-3-2-6. Modèle AFREM pour les bétons à hautes performances	51
3-3-2-7. Estimation du retrait de béton de sable	52
3-3-2-8. Modèle de LOUKILI	54
3-3-2-9. Autre modèles de retrait	54
3-3-3. Modèles de prévision de retrait pour béton renforcé de fibres métallique	56
3-3-3-1. Modèle de MANGAT et AZARI	56
3-3-3-2. Modèle proposé par Hacène HOUARI	57
3-3-3-3. Modèle de YOUNG et CHERN	58
3-3-3-4. Le retrait du béton conservé dans les environnements naturels suivant le modèle ACI209	59
3-4. Modélisation du fluage	61
3-4-1 Introduction	61
3-4-2 Modélisation du fluage d'un béton non renforcée	61
3-4-2 -1. Modèle de ROSSE et LORMAN	61
3-4-2-2. Modèle de LOUKILI	63
3-4-2-3. Estimation du fluage de béton de sable	63
3-4-2-4. Les modèles Eurocode2 (EC2) et le modèle B3 du ACI 209	65
3-4-2-5. Autre modèles du fluage	67
3-4-3. Modèles du fluage pour le béton renforcé par les fibres	69
3-4-3-1. Modèle de SHEKARCHI-DEBICKI	69
3-4-3-2. Modèle de MANGAT et AZARI	70
3-5. Conclusion	72

CHAPITRE 4 : Etude et modélisation du retrait et fluage des bétons de fibres de palmier dattier

4-1. Introduction	74
4-2. Présentation des travaux de MERKHOUI sur les déformations rhéologiques du béton renforcés par les fibres de palmier dattier	74
4-2-1. Essai de retrait	75
4-2-2. Essai de fluage	77
4-3. Présentation des travaux de KRIKER sur le retrait du mortiers renforcés par les fibres de palmier dattier	79
4-4. Modélisation du retrait du béton de palmier dattier	82
4-4-1. Adaptation du modèle de Young et Chern pour le retrait de béton de fibre de palmier dattier	82
4-4-2. Modélisation de retrait du mortier renforcé par les fibres de palmier dattier	93
4-4-2-1. Adaptation du modèle de Young et Chern	93
4-4-2-2. Application de l'expression de Hacène HOUARI	96
4-5. Modélisation du fluage du béton de palmier dattier	100

4-5-1. Application du modèle Loukili pour le béton ordinaire	101
4-5-2. Adaptation du modèle Loukili pour le béton de fibres de palmier dattier	102
4-5-3. Adaptation du modèle Mangat et Azarie pour le fluage de béton de fibres de palmier dattier	106
4-6. Conclusion	112
Conclusion générale	115
Bibliographie	118
Annexes	125

المخلص

في المناطق ذات المناخ الحار و الجاف مثل المناطق الصحراوية من وطننا لها تأثير سلبي على المركبات الهيدروليكية مما يسبب انكماش و تشققات على مستوى المنشأ ، لذا كان تعزيز مثل هذه المركبات بالألياف من بين الحلول التقنية المثلى لتحسين خصائص الانكماش و الزحف، فالباحث في هذا المجال يجد الكثير من المراجع التي تناولت تعزيز الخرسانة بالألياف المعدنية لأجل التقليل من ظاهرتي الانكماش و الزحف، عكس الألياف الطبيعية حيث يفاجيء بندرة الأبحاث و المراجع و هذا نتيجة لحدثة موضوع البحث .

نظرا للتعقيد الموجود في الخصائص الميكانيكية للخرسانة يستوجب دراسة معمقة و دقيقة من أجل نمذجة هذه الخصائص، في هذا المضمار نجد الكثير من الباحثين يحاولون إيجاد نماذج رياضية للسلوك الريولوجي لخرسانة الألياف و ذلك باستعمال الطرق و النظريات الرياضية و الفيزيائية المتطورة .

إن الهدف من هذه الدراسة يتمثل في ما يلي

- ❖ إبراز و تحليل أسس النمذجة.
- ❖ دراسة ظاهرتي الانكماش و الزحف لخرسانة ألياف النخيل و من ثم نمذجة النتائج المتعلقة بهما.

توصلنا في دراستنا إلى إمكانية نمذجة كل من الانكماش و الزحف لخرسانة ألياف النخيل و ذلك بعد إجراء تغييرات على مستوى نماذج سابقة انطلقا من دراسة مخبرية أجريت مسبقا على مستوى المخبر .

كلمات مفتاحية: خرسانة الألياف ، مالط الألياف ، ألياف نباتية ، ألياف النخيل المثمر ، نموذج ، تشوهات ، الانكماش، الزحف الخراساني.

ABSTRACT

Materials on cement basis, such as the concrete and mortar have weak resistance to traction and cracking. The hot and dry environments - like the Sahara regions of our country-dry these hydraulic materials and hence induce important shrinkages on materials and cracks in structures. The reinforcement of these materials by the fibres gives an improvement in rheological performances (shrinkage and creep).

In the literature we have found several works regarding reduction of the shrinkage and creep of concrete, phenomenon by using the metallic fibres. Furthermore, the complexity of phenomenon rheologiques in concretes of fibres and the severity of constraints that are applied need a good survey and a good precision in the simulation. In this way, researchers have been concerned with the survey and the development of models that can simulate rheologique behaviour of Concretes fibres.

The objective of this research is:

- To develop modelling principles of rheologique and mortars of fibers behaviour of concrete.
- To study the modelling of the shrinkage and creep of concretes of the date palm fibres. With the exhibition and some models based on mathematical laws.

In this survey we will propose two models for the prediction of the shrinkage and two for the creep, the application of these models gives acceptable results.

Key words: Concrete of fibre; Mortar of fibres; Plant fibres; date palm fibres; Model; shrinkage;creep.

RESUME

Les matériaux à base de ciment, en l'occurrence le béton et le mortier classique résistent très mal à la traction et à la fissuration. Les environnements chauds et secs, telles que les régions sahariennes de notre pays dessèchent ces matériaux hydrauliques ce qui induit des retraits importants sur les matériaux et des fissures dans les structures. Le renforcement de ces matériaux par des fibres offre des solutions techniques pour l'amélioration des performances rhéologiques (retrait et fluage)

Dans la littérature nous trouvons plusieurs travaux relatifs à la réduction des retraits des bétons en les renforçant par des fibres métalliques. Mais il existe en revanche peu de travaux consacrés au retrait des bétons de fibres végétales.

La complexité du phénomène rhéologique dans les bétons de fibres et la sévérité des contraintes qui lui sont appliquées nécessite une bonne étude et une bonne précision dans la simulation. Dans cet esprit, plusieurs chercheurs se sont penchés pour l'étude et l'élaboration des modèles qui peuvent simuler le comportement rhéologique des bétons de fibres.

L'objectif de cette recherche est:

- De développer les principes de modélisation du comportement rhéologique des bétons et mortiers de fibres.
- D'étudier la modélisation du retrait et fluage des bétons de fibres de palmier dattier. Avec l'exposition et la proposition de quelques modèles ou lois mathématiques.

Dans cette étude seront proposés deux modèles pour la prédiction du retrait et deux pour le fluage inspirés d'autres modèles de la littérature, et basés sur les résultats expérimentaux réalisés au laboratoire sur les bétons et mortier de fibres de palmier. L'application de ces modèles nous a donné des résultats acceptables.

Mots clés : Béton de fibre ; Mortier de fibres; Fibre végétale ; Fibre de palmier dattier ; Modèle ; Déformation; Retrait; Fluage.

LISTE DES TABLEAUX

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

Tableau 1-1 : Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres	5
Tableau 1-2 : Différents types de fibres pour le renforcement du béton	6
Tableau 1-3 : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales	9
Tableau 1-4 : Principales propriétés physiques des FSPD (Dokar, Elgars, D-Nour et Deglat-Bida).....	10
Tableau 1-5 : Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment	10
Tableau 1-6 : Les utilisations des fibres végétales.....	11
Tableau 1-7 : Résistance à la traction (R_t) et à la flexion (R_f) de quelques BF par rapport au béton classique (BC)	12

Chapitre 2 : Généralités sur le retrait et le fluage des bétons

Tableau 2-1 : les types de fibres utilisés dans l'étude de H. VERONIQUE.....	17
Tableau 2-2 : Les différentes compositions de béton de Barr et all	21
Tableau 2-3 : Caractéristiques des essais de l'influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait du béton.....	24
Tableau 2-4 : Facteurs influençant le fluage.....	26
Tableau 2-5 : Fluage spécifique final des bétons de résistances différentes, chargés à l'âge de 07 jours.....	27
Tableau 2-6 : Caractéristiques des essais de l'influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait du béton.....	30
Tableau 2-7: résumés des observations sur les paramètres d'influence sur le retrait	32
Tableau 2-8 : Résumés des observations sur les paramètres d'influence sur le fluage.....	33

Chapitre 3 : Modélisation des retraits et fluages des bétons

Tableau 3-1 : Les variables des modèles EC2 et B3	45
Tableau 3-2 : Proportions des composants et propriétés mécaniques des bétons utilisés.....	45
Tableau 3-3 : Coefficient de variation d'erreurs (en %) pour le retrait des bétons A1, A2 et A3.....	46
Tableau 3-4 : composition du mortier.....	48
Tableau 3-5 : Les mesures expérimentales de TDC	49
Tableau 3-6 : Formulation du béton d'essai.....	52
Tableau 3-7 : Retrait expérimental et réglementaire du B.S.....	54
Tableau 3-8 : Les variables des modèles EC2 et B3	65
Tableau 3-9 : Coefficient de variation d'erreurs (en %) pour le retrait des bétons A1, A2 et A3.....	66

Chapitre 4 : Etude et modélisation du retrait et fluage des bétons de fibres de palmier dattier

Tableau 4-1 : Composition du béton de fibres de palmier dattier utilisée par Merkhoufi.....	75
Tableau 4-2 : Résultats expérimentaux du retrait du béton de fibre de palmier.....	76
Tableau 4-3 : Résultats expérimentaux de fluage du béton de fibre de palmier.....	78
Tableau 4-4 : La composition de mortier de fibres de palmier par moule	80
Tableau 4-5 : Résultats expérimentaux du retrait du mortier de fibre de palmier	81
Tableau 4-6 : Résultats de calcul par Young et Chern du retrait du béton de fibre de Palmier	83
Tableau 4-7 : les valeurs des facteurs de temps $C(t)$, τ_s , et $Q(t)$ Young et Chern du béton de fibre de palmier.....	83
Tableau 4-8 : Retrait ultime de béton de fibre.....	83
Tableau 4-9 : Retrait de béton de fibre Young et Chern non modifié.....	84
Tableau 4-10 : Retrait de béton de fibre Young et Chern modifié.....	89
Tableau 4-11: Retrait ultime du mortier de fibre de palmier Young et Chern	93
Tableau 4-12 : Retrait de mortier de fibre Young et Chern modifié.....	93
Tableau 4-13 : Retrait de mortier de fibre Houari modifié.....	97
Tableau 4-14 : Fluage de béton ordinaire : (Taux de chargement=10%)	101
Tableau 4-16 : Module élastique des fibres de palmier.....	107
Tableau 4-17 : Fluage de béton de fibre de palmier (Mangat et Azarie modifié)	108

LISTES DES FIGURES

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

Figure 1-1 : Matériau composite.....	3
Figure 1-2 : Les classes des fibres végétales.....	7

Chapitre 2 : Généralités sur le retrait et le fluage des bétons

Figure 2-1 : Influence de la nature des fibres sur le retrait.....	17
Figure 2-2 : Influence des fibres organiques de la longueur de 06 mm sur le retrait du béton	18
Figure 2-3 : Influence des fibres organiques de la longueur de 13 mm sur le retrait du béton	18
Figure 2-4 : Influence des fibres de polypropylène sur le retrait.....	19
Figure 2-5 : Retrait et perte du poids de béton de fibres métalliques.....	20
Figure 2-6 : Influence de lavage des fibres de palmier sur le retrait.....	22
Figure 2-7 : Retrait des mortiers de fibres à base de ciment CHF conservés dans la cure CU	23
Figure 2-8 : Déformations du fluage.....	25
Figure 2-9 : Variation de la flèche pour différent taux du chargement.....	27
Figure 2-10 : Influence de l'humidité relative.....	29
Figure 2-11 : Influence de lavage des fibres pour différents milieux de Conservation.....	31

Chapitre 3 : Modélisation des retraits et fluages des bétons

Figure 3-1 : Schéma du principe logique à la base de la recherche des Modèles.....	36
Figure 3-2 : Schéma de l'évolution du modèle vers la loi.....	36
Figure 3-3 : le retrait de béton pour les mesures expérimentales et du modèles ACI et B3 ...	47
Figure 3-4 : Séparation de déformation thermique et du retrait	50
Figure 3-5 : Estimation de la compatibilité retrait CEB-FIP – retrait Expérimental	53
Figure 3-6 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et des modèles ACI	60
Figure 3-7 : Comparaison entre la courbe expérimentale et les courbes Théoriques	62
Figure 3-8 : Estimation de la compatibilité fluage CEB-FIP-BPEL.Fluage	64
Figure 3-9 : Comparaison des résultats expérimentaux et de la modélisation du fluage	66

Chapitre 4: Etude et modélisation du retrait et fluage des bétons de fibres de palmier dattier

Figure 4-1 : Variation du retrait de béton de fibre(0.4%) pour différentes longueurs (conservation à air libre)	76
Figure 4-2 : Variation du retrait de béton de fibre (l=6cm) pour différents % de fibres (conservation à air libre)	76
Figure 4-3 : Variation du retrait de béton de fibre(l=6cmVf= 0.4%) pour différents modes de conservation	77
Figure 4-4 : Variation de fluage de béton de fibre pour différents modes de conservation...	78
Figure 4-5 : Influence de la longueur des fibres sur le fluage	78
Figure 4-6 : Influence de taux de chargement sur le fluage (éprouvettes conservées).....	79

Figure 4-7 : Retrait des mortiers de fibres de palmier conservés dans l'étuve (CU).....	81
Figure 4-8 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE7-CU.....	81
Figure 4-9 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE14-CU	81
Figure 4-10 : Retrait des bétons de fibre de palmier dattier par modèle Young et Chern	86
Figure 4-11 : Estimation du retrait du béton de fibre de palmier dattier	92
Figure 4-12 : Estimation de retrait de mortier de fibre de palmier dattier	96
Figure 4-13 : Estimation de retrait de mortier de fibre de palmier dattier (modèle Houari modifié).....	100
Figure 4-14 : Estimation de fluage de béton témoin, conservée par le modèle Loukili (Taux de chargement=10%).....	102
Figure 4-15 : Estimation du fluage de béton de fibre de palmier dattier	106
Figure 4-16 : Estimation du fluage de béton de fibre de palmier dattier par Mangat et Azarie	111

NOTATIONS UTILISEES

a) Lettres françaises

A : aire de la matrice cylindrique autour d'une fibre isolée

A_s : section d'armature longitudinale adhérente

a : coté de l'éprouvette

A/C : rapport agrégat/ciment

b : largeur de la fibre

C : dosage en ciment du béton.

C(t) : fonction de l'âge

C_j : courbure totale de l'éprouvette

D : diamètre maximal des granulats, diamètre des fibres, épaisseur effective de l'éprouvette

D_{\max} : diamètre maximal des granulats.

d : diamètre de la fibre.

e : porosité.

E : dosage en eau du béton, module de Young du composite.

E/C : rapport eau / ciment.

E_c : rigidité de la matrice

E_E : module élastique du béton

E_m : module de Young de la matrice.

E_f : module de Young des fibres.

E_s : module de Young de l'acier

ES : équivalent de sable.

e : épaisseur de la fibre.

eh : hygrométrie ambiante

E_d : module d'élasticité dynamique.

F : force maximale de chargement, charge de rupture en flexion, compression et traction.

F_t : charge de rupture à la traction des fibres.

f₁(t,b): facteur fonction du temps

f₂(t,b): facteur fonction de l'épaisseur de l'éprouvette

G : dosage en gravier du béton.

K' : paramètre qui dépend de la température ambiante

Kh : paramètre qui dépend de l'humidité ambiante

K_s : facteur fonction de la forme

L : longueur d'éprouvette.

l : longueur de la fibre

l/d : élancement

l(y) : largeur de la section à la distance y de l'axe principal

M_f : module de finesse du sable.

N(t) : effort normal appliqué à la section à l'instant t

P : pression radiale

Q(t*) : facteur fonction du temps

R_m : rayon moyen de l'éprouvette
 R_{c_j} : résistance à la compression à J jours.
 R_{t_j} : résistance à la traction à J jours.
 S : dosage en sable, section transversale.
 S/G : rapport sable / gravier.
 SSB : surface spécifique de Blaine.
 s : espacement des fibres
 TA : taux d'absorption des fibres après 24 h.
 $T^{\circ}C$: température ambiante
 t^* : durée de séchage
 t_1 : âge de mise en charge
 V_f : volume des fibres.
 Y_y : distance d'une fibre à l'axe principal

b) Lettres grecques

δ : déformation à la rupture des fibres.
 ν : coefficient de Poisson du béton.
 ν_s : coefficient de Poisson de l'acier.
 ρ_a : masse volumique apparente.
 ρ_s : masse volumique absolue.
 ρ : masse volumique absolue, masse volumique du béton.
 σ_f : résistance à la flexion.
 σ_c : contrainte de compression.
 σ_t : contrainte de traction.
 $\sigma(t, y)$: contrainte à l'instant t et à la distance y de l'axe principal
 μ : coefficient de friction.
 τ : contrainte du lien interfacial
 τ_s : coefficient fonction de la forme ou dimension de l'éprouvette

c) Symboles

Δ : déplacement, flèche à mi-portée de l'éprouvette.

d) Abréviations

B : béton
 BC : béton classique, Béton courant.
 BF : béton de fibre
 CE : conservation dans l'eau.
 CA : conservation à air libre.
 CU : conservation dans l'étuve.
 $CE7-CA, CE7-CU, CE14-CA$ et $CE14-CU$: Conservation mixtes.
 MC : mortier classique.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le titre de ce mémoire pourrait être à lui seul le sujet d'un nombre incalculable de volume, car sous ce titre ils pourraient être réunis : la modélisation, les phénomènes rhéologiques, les problèmes d'environnements désertiques, l'amélioration et l'exploitation des ressources locales. Pour cela nous allons nous limiter aux lois permutant la modélisation des retraits et fluages des bétons et notamment les bétons de fibre.

Le béton et sans aucun doute le matériau le plus utilisé dans la construction, vu ces multitudes avantages, néanmoins, il résiste mal à la traction et à la fissuration, c'est pourquoi il est armé par l'acier ou renforcé par les fibres.

Le concept de l'utilisation des fibres pour améliorer le comportement des matériaux de construction est très ancien.

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 retraits 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 de Ouargla - s'impose pour clarifier l'effet positif de l'incorporation de ce type de fibres.

De ce fait, notre étude entre dans un cadre global qui s'intéresse à l'étude du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés par les fibres de palmier dattier, une première partie expérimentale a été effectuée par les deux chercheurs : MERKHOUFI et KRIKER, ainsi cette présente étude constitue la deuxième partie qui s'intéresse à la modélisation de ces deux phénomènes.

L'objectif du présent travail est d'une part, d'exposer à partir d'une recherche bibliographique très riche des informations sur les fibres, le béton de fibre et les phénomènes rhéologiques néfastes (retrait et fluage), et d'autre part de donner les principales indications permettant

d'établir les règles nécessaires pour la modélisation du comportement rhéologique des bétons et mortier de fibre.

Ce document a été présenté en quatre (04) chapitres successifs dans un ordre logique :

- Le premier est une recherche bibliographique, qui se compose de deux axes : l'un présente de façon générale les fibres : ses propriétés et applications dans le domaine de construction et dans d'autre domaine, l'autre s'intéresse aux bétons de fibre.
- Dans le deuxième chapitre, nous exposons des notions sur les deux phénomènes rhéologiques : retrait et fluage.
- Dans le troisième chapitre nous donnons des généralités sur la modélisation et quelques modèles de retrait et fluage de la littérature.
- Le dernier chapitre présente les résultats expérimentaux du retrait et du fluage du béton renforcé par les fibres de palmier dattier et par la suite, nous proposons quelques modèles propres au béton et mortier de fibres de palmier.

Après l'analyse des quatre chapitres, nous finissons notre étude par une conclusion générale explicite du phénomène du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier en zones arides.

Chapitre I

GENERALITES SUR LES FIBRES ET LES BETONS DE FIBRE

Généralités sur les fibres et les bétons de fibre

1-1. Introduction

Les bétons de fibre sont de plus en plus utilisés dans le domaine de la construction, on appelle béton, le matériau constitué par le mélange, dans des proportions convenables, de ciment, de granulats (sables, gravier) et d'eau. 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.

Le béton est le matériau le plus utilisé dans la construction, grâce à ses propriétés à savoir la facilité de moulage, la rigidité, la résistance à la compression et la tenue au feu.

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 tels que la géométrie, la nature, les caractéristiques mécaniques, le facteur de forme et l'élanement des fibres.

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

1-2. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué d'un mélange de plusieurs phases de nature, de structure, de composition physique et chimique distincte, et des propriétés mécaniques variées. 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 (figure1-1)

Généralement, dans le domaine de construction on utilise comme :

- Matrice : ciment, mortier, béton, plâtre, résine...
- Renfort : barres, fibres, fils...

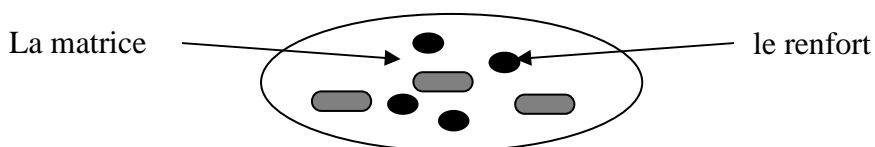


Figure1-1 : Matériau composite[1-3]

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

L'idée de l'utilisation des fibres est très ancienne. Les fibres ont été utilisées dans la fabrication des cordes et textiles. Comme élément de renforcement des matériaux de construction traditionnels, la première utilisation des fibres a été observée dans la fabrication des briques argileuses ou dans les mises en œuvre des plâtres, et spécialement par des fibres végétales.

La naissance de la fibre industrielle, suite aux développements technologiques, a augmenté les champs d'applications des fibres dans plusieurs domaines. Utilisé dans le domaine des textiles depuis le XIX^e siècle sous forme de fibre de coton, et à partir de l'année 1935 la fibre de Nylon (plastique), et récemment la fibre de polypropylène prédomine depuis l'année 1950 la production des cordes et câbles utilise les fibres de verre et d'acier. Cependant, dans le domaine de la construction, la première fibre utilisée dans le renforcement des ciments fut la fibre d'amiante vers les années 1900 [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 technologie 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 tels que le sisal, la jute et la hampe dans le renforcement des matériaux de construction et particulièrement dans les ciments [8]

L'avenir du développement dans le domaine du béton de fibre sera fort probablement attribué aux fibres végétales, notamment pour les pays en voie de développement.

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

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, parmi eux nous citons :

- 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	Densité 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

D'après [4], DEBICKI a résumé sur le tableau 1-2 quelques propriétés de fibres industrielles. Il met en évidence la nature très variée de ces fibres.

Tableau 1-2 : Différents types de fibres pour le renforcement du béton [4]

MATURE DE LA FIBRE	FORME DE LA FIBRE	COUPE DE LA FIBRE	LONGUEUR DES FIBRES	ELANCEMENT L/φ ou L/e	DIMENSIONS DES GRANULATS ASSOCIES AUX FIBRES (mm)			X VOLUMIQUE DE FIBRE		
					< 1	< 5	< 10			
Renforts discontinus-Fibres	acier	relief irrégulier		25 - 35	25 - 55		x	x	1 à 3 X	
		lisse		16 - 32	110		x	x	0,7 à 2 X	
	acier	formes particulières		6 - 30			x	x	x	0,7 à 3 X
		Fonte amorphe		30 - 40	100-150		x	x	x	0,7 à 2 X
		Verre		30 - 40	1200-1400		x	x	x	0,7 à 2 X
	Carbone			10 - 20	150-400		x	x		5 à 6 X
				3 - 15			x			2 à 5 X
	Aramide			1 - 10	100-800		x			1 à 3 X
				10 - 30	140-1700		x	x	x	2 à 8 X
	Amlante			5	5000					5 à 10 X
	Mélange hybride : cellulose + polypro. ou polyéthylène ou PVA etc (pour tenue à long terme)									
	Renforts continus	Aramide	FIBRES ENDUITES DE RESINE					x	x	x
FIBRES ENDUITES DE RESINE						x	x	x	x	
Verre		FILETS					x	x	x	4 à 7 X
		FIBRILLES TISSES					x	x	x	x

1-5. Les fibres végétales :

1-5-1. Introduction

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

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine du renforcement de ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs recherches sont orientés 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(figure 1-2): les fibres de feuilles, de tiges, de bois et de surface

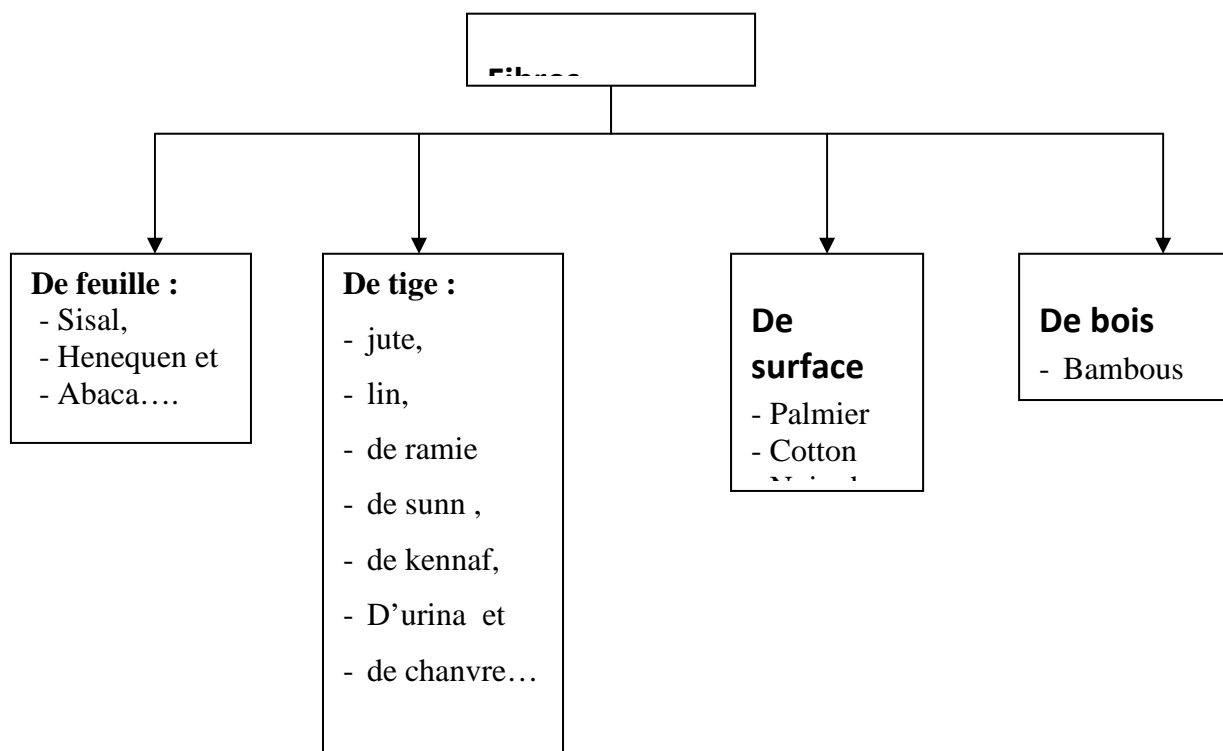


Figure1-2 : Les classes des fibres végétales[2,4]

A. Les Fibres de feuilles

Ces fibres sont dures et rigides[4] ; les fibres de feuille les plus cultivées sont: la fibre de Sisal, de 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 feuille.

B. Les fibres de tiges

Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de coir et 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. Nous citons entre autre le coton et la noix de coco [8-11]

Par ailleurs, **les fibres de palmier**, qui entourent son tronc, appartiennent à cette famille de fibres.

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 1-3)

Tableau 1-3 : 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 peut citer les fibres de palmier dattier, dans le sud de notre pays, il y'a plus de 800 variétés de palmier dans les oasis d'après des statistiques universitaires[4]

Les types les plus connus sont : Deglette Nour, Dokar, Elghers...(appellation locale)

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

d'après la bibliographie, on peut résumer(Tableau 1-4) les propriétés physiques principales des fibres de surface de palmier dattier

Ainsi parmi les caractéristiques des fibres de surface de palmier dattier, on peut citer d'après les chercheurs [4,18] :

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

Tableau 1-4 : 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 (retrait et fluage)

A titre d'exemple le tableau (1-5) résume les diverses applications des fibres dans les produits cimentaires.

Tableau 1-5: Application de divers renforcements de 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.

Dans l’histoire on trouve que l’amélioration de la résistance des sols pour avoir une terre stabilisée(fabrication de briques du BTS : béton de terre stabilisée) passe le plus souvent par l’incorporation des fibres qui vont reprendre et répartir les contraintes[19], les tensions qui s’exercent dans et sur la terre, pour ce la plusieurs sortes de fibres végétales sont utilisées dans ce but(paille, écorce, aiguilles de pin)

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 utilisées dans d’autres domaines pratiques comme indiquent le tableau 1-6

Tableau 1- 6 : 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/PP, Jute/PP, Curaua/PP	Matériaux composites

PP : Polypropylène

1-7. Les bétons de fibres

Le matériau composite bétons de fibres 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 1-7 donne la résistance à la traction (Rt) et à la flexion (Rf) de quelques bétons de fibre.

Tableau 1-7 : 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 béton de fibres végétales est un matériau composite relativement nouveau, la composition de deux matériaux non homogènes à savoir le béton et les fibres végétales, ce qui rend sa caractérisation plus difficile.

1-8. Conclusion :

Nous avons donné dans ce chapitre un aperçu général sur les fibres et les bétons renforcé par les fibres, passant par les différents types de fibres, et en détaille pour les fibres végétales, ensuite nous avons donné quelque caractéristiques physiques et mécaniques de ces derniers, enfin nous avons terminé ce chapitre par les grandes axes d'utilisation des fibres dans les divers domaines.

L'idée d'utilisation des fibres est très ancienne, du 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 présente 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 terme de renforcement sera attribué aux fibres naturelles, ou bien à la limite aux fibres composites (polymère végétale). Pour cela, il est temps d'orienter les axes de recherches 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, nous remarquons bien que le renforcement des matériaux à base du ciment peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration de leurs propriétés mécaniques et rhéologiques.

Chapitre II

GENERALITES SUR LE RETRAIT ET LE FLUAGE DES BETONS

Généralités sur le retrait et le fluage des bétons

2-1.Introduction

Le béton possède une structure extrêmement complexe, car il formé de matériaux de nature minéralogiques différente ; et d'une phase liquide dont l'influence est importante au cours de chargement de la structure et même au repos.

Dans les environnements secs et chauds, un grand nombre d'ouvrages et de constructions en béton subit diverses actions climatiques (action de la chaleur, et de l'humidité basse), ce qui induit des déformations rhéologiques défavorables tels que le retrait et le fluage.

Quelle est la définition et les types de ces phénomènes rhéologiques ?, Quels sont les paramètres influençant sur le retrait et le fluage ?

Dans ce qui suit, nous allons répondre en détail à ces différentes questions.

2-2. Le retrait

2-2-1. Définition

Lorsque l'on observe une pièce en béton, et même son gâchage, on constate qu'en l'absence de toute force extérieure, elle change de volume. Cette propriété, qui a pris le nom de retrait. Il est, en réalité, la résultante de mouvements complexes qu'il est intéressant d'analyser, il est important de préciser qu'il existe plusieurs types de retrait qu'on va détailler par la suite [21]

2-2-2. Causes de retrait du béton :

Puisque le retrait est dû en grande partie, à l'évaporation de l'eau, deux conditions s'imposent pour limiter le retrait : l'une est l'emploi minimal d'eau de gâchage, l'autre est la protection contre la dessiccation pendant et après la prise.

Les autres causes sont dues aux causes suivantes : [20-23]

- Liant :

A sa composition chimique et physique, et même au dosage utilisé. En effet pour des ciments de mêmes natures, le retrait augmente avec la finesse de mouture et avec l'augmentation du dosage en ciment.

Pour un ciment artificiel normal le retrait est de 0.3 mm/m et de 2.2 mm/m respectivement à 01 jour et à un an. Par contre, Pour les ciments alumineux et dans les mêmes conditions de conservation, le retrait à 1 jour et 1 an est de 1.0 mm/m et 3.7 mm/m respectivement.[21]

Ainsi, les ciments alumineux, métallurgiques et naturels prennent plus de retrait que les ciments artificiels, certains chercheurs ont supposé que la teneur en Alumine avait une influence défavorable sur le retrait.

-Propriétés du béton ou du mortier : les retraits sont influencés aussi par la nature et la granulométrie des agrégats, la consistance, le mode de mise en œuvre, les produits d'addition...[22-23].

Les agrégats concassés provoquent un retrait plus élevé que les matériaux roulés [21]. L'excès d'éléments fins, et la diminution de la grosseur maximum ont la même action, ainsi que toutes les causes tendant à augmenter l'eau.

La ségrégation au cours de la mise en œuvre, provoque une remontée de laitance, et par conséquence augmentation le retrait.

Certains produits d'addition comme l'huile, la paraffine, le savon, les sels contenus dans l'eau de gâchage, les substances colloïdales, la présence du gaz carbonique sont également néfastes sur le retrait [23].

La température : l'action de température est complexe [21]. Le béton, comme tous les matériaux, subit d'une part l'effet de la dilatation calorifique, d'autre part, les variations thermiques de l'atmosphère entraînent une modification de la concentration en vapeur d'eau. Si par exemple, la température s'élève, l'atmosphère devient plus sèche et provoque un certain retrait.

2-2-3. Types de retrait :

Lorsque l'eau se retire d'un corps poreux qui n'est pas parfaitement rigide, une contraction volumétrique se produit dans le béton ou le mortier, qu'il soit à l'état frais ou à l'état durci, pour cela il existe deux formes principales de retrait : retrait avant la prise et retrait après la prise [1,20-22]. Les paragraphes suivants traitent les différents types de retrait.

2-2-3-1. Retrait avant la prise : premier retrait ou le retrait plastique :

Lorsque le béton est encore à l'état plastique, l'eau évaporée à partir de la surface du béton ou par succion au contact du matériau support, que ce soit du béton sec, du sol ou même du coffrage non humide provoque un retrait dit plastique. L'importance du retrait plastique est

influencée par la quantité d'eau perdue à la surface du béton, qui est elle-même influencée par : La température, l'humidité relative ambiante, et la vitesse du vent [22].

En général; Lorsque la température augmente, l'humidité relative diminue, et avec une augmentation de la vitesse de vent, le retrait augmente

2-2-3-2. Retraits après la prise

Deux origines à noter pour les retraits après la prise du béton : [20-23]

A. Retrait endogène ou l'auto dessiccation :

Après la prise, des changements volumétriques se produisent et peuvent prendre la forme de retrait ou de gonflement :

Lorsqu'un apport d'eau existe, la poursuite de l'hydratation conduit à une expansion ;par contre, lorsque le mouvement d'humidité de ou vers la pâte de ciment n'est possible, on observe du retrait, ce dernier est la conséquence de l'absorption de l'eau des pores capillaires due à l'hydratation du ciment non encore hydraté, le retrait est connu comme étant le retrait endogène ou variation volumétrique endogène s'il produit, à l'intérieur des pièces massives de béton, il n'est pas très important, sauf pour les très faibles rapports eau/ciment, et dans les cas pratiques, il n'est pas nécessaire de distinguer du retrait dû au séchage du béton.

On conclut que le retrait endogène est lié aux modifications de la pâte de ciment. C'est la déformation d'un matériau vieillissant (faisant prise et durcissant) sans échange d'eau avec l'extérieur.

B. Retrait de dessiccation :

L'évaporation de l'eau d'un béton conservé dans de l'air non saturé provoque du retrait dit de séchage. Le changement de volume d'un béton en cours de séchage n'est pas égal au volume d'eau évaporée. Avec la poursuite du séchage, l'eau adsorbée disparaît et le changement de volume de la pâte de ciment hydraté non bloqué correspond approximativement dans cette étape à la perte d'un film d'eau de l'épaisseur d'une molécule à la surface de toute particule du gel [21].

Le retrait de dessiccation est lié aux mouvements de l'eau entre le béton et le milieu extérieur [23].

Plusieurs travaux de recherche relatifs 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 utilisées ... etc. A titre d'exemple, nous citons les travaux de :

REHSI [24] 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. [25] confirment la réduction du retrait par rapport au béton classique, mais avec 30% au lieu de 50%.

ZOLLO et all.[26], 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[27] 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[28] ont montré qu'au climat chaud et sec de l'Arabie Saoudite, l'introduction des fibres métalliques (dosé à 1% en volume), a permis de réduire le retrait global de 30% après une conservation de 200 jours.

MERKHOUI[1] 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.

2-2-4. Facteurs influençant sur le retrait d'un béton de fibre :

Comme il a été mentionné précédemment, plusieurs facteurs interviennent dans le retrait du béton renforcé par les fibres; comme : le mode de conservation, la composition du béton, la nature, la longueur, la quantité ou le dosage, et le lavage des fibres.

2-2-4-1. 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.) Avec une longueur fixe de 30mm ; HOUARI [23] a montré la variation de retrait suivant le type ou la nature des fibres utilisées, les résultats d'essai sont présentés dans la figure (2-1) ci dessous.

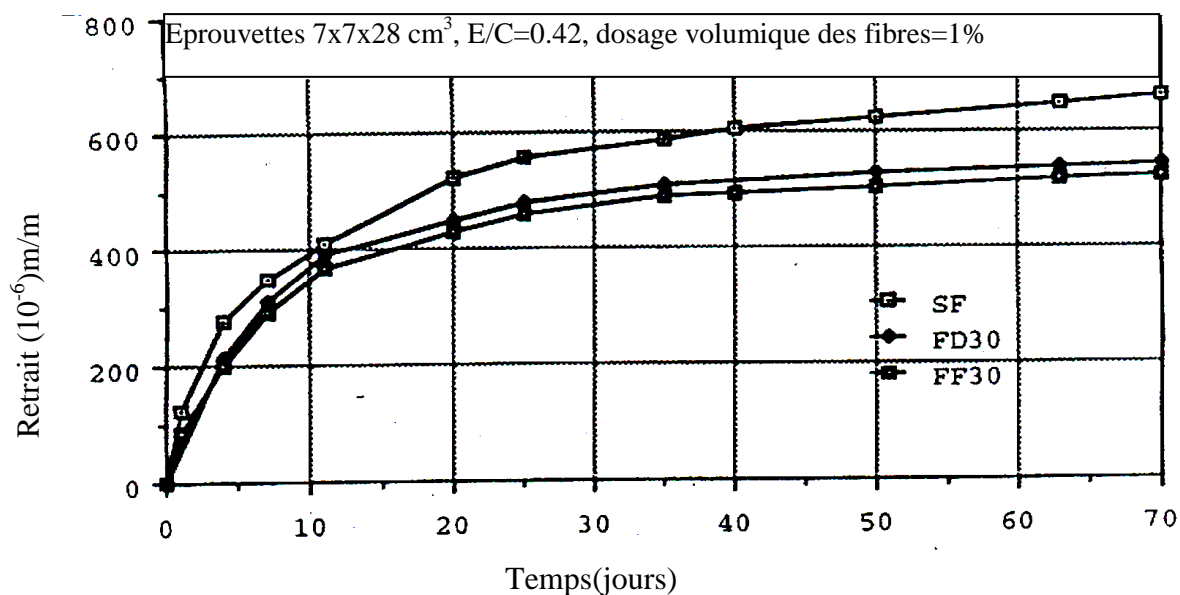


Figure2-1 : Influence de la nature des fibres sur le retrait [23]

D'autre part, les essais de HOUGGET VERONIQUE [29] sur les fibres organiques, montrent l'influence de la nature et la longueur des fibres sur le retrait comme l'indiquent les figures 2-2 et 2-3. Le tableau 2-1 résume les différents types de fibres utilisées et la dénomination correspondante [9,67]

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

Fibre	Longueur de fibre(mm)
Béton témoin (BT)	-
Poly-Amide (PA)	06-13
Poly-acrylonitril(PAN)	06-13
Poly-Vinilakol (PVA)	06-13
Poly-Aramide (PWA)	06
Charbon (TEN)	06

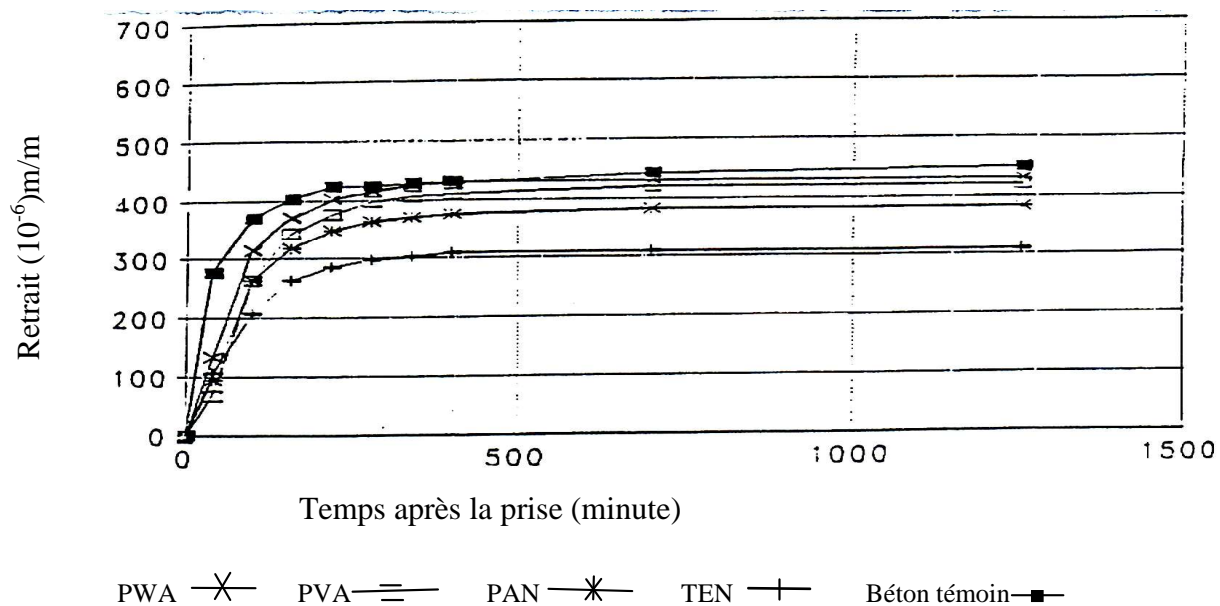


Figure 2-2 : Influence des fibres organiques de la longueur de 06 mm sur le retrait du béton [29]

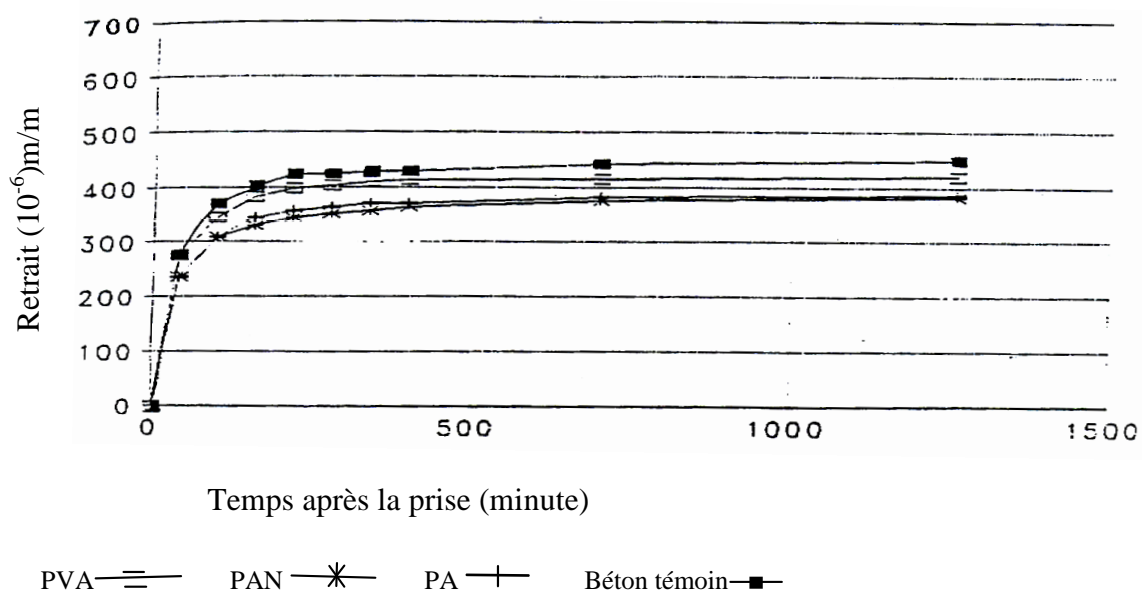


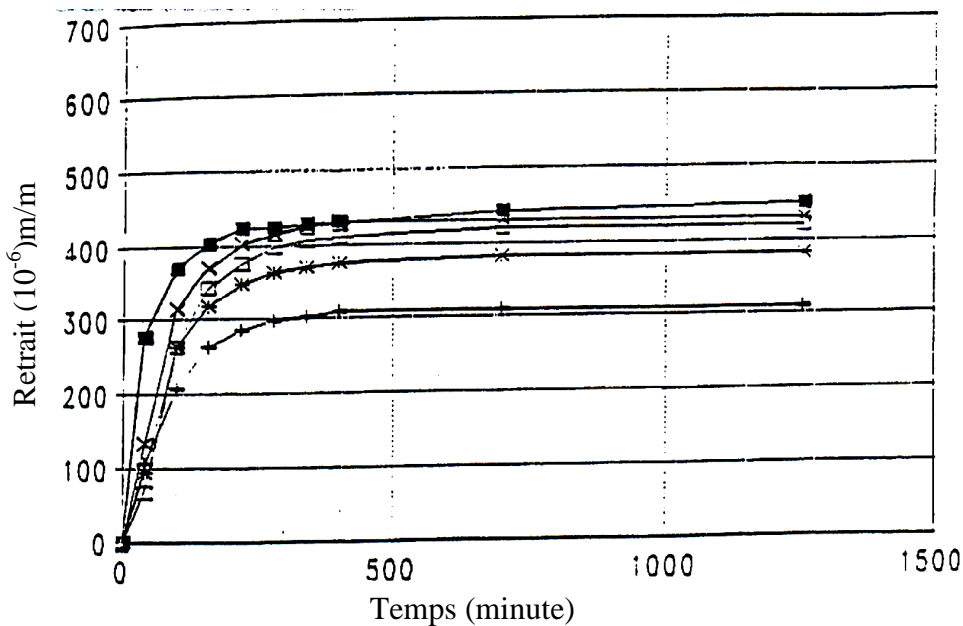
Figure 2-3 Influence des fibres organiques de la longueur de 12 mm sur le retrait du béton [29]

A partir de ces résultats, HOUGGET [29] 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. [25] 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.

2-2-4-2. Influence de la quantité des fibres :

Les résultats d'essai de HOUGGET [29] 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 [29] montre que le choix convenable de la quantité des fibres joue un rôle très important sur la diminution de retrait des bétons de fibre.



2000g/m³ * 1500g/m³ □ 900g/m³ x 500g/m³ + Béton témoin ■

Figure 2-4 : Influence des fibres de polypropylène sur le retrait [29]

Les chercheurs BYOUNGGGEON et JASON [30] 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 conclut que lorsque le volume des fibres augmente le retrait diminue, comme l'indique la figure 2-5.

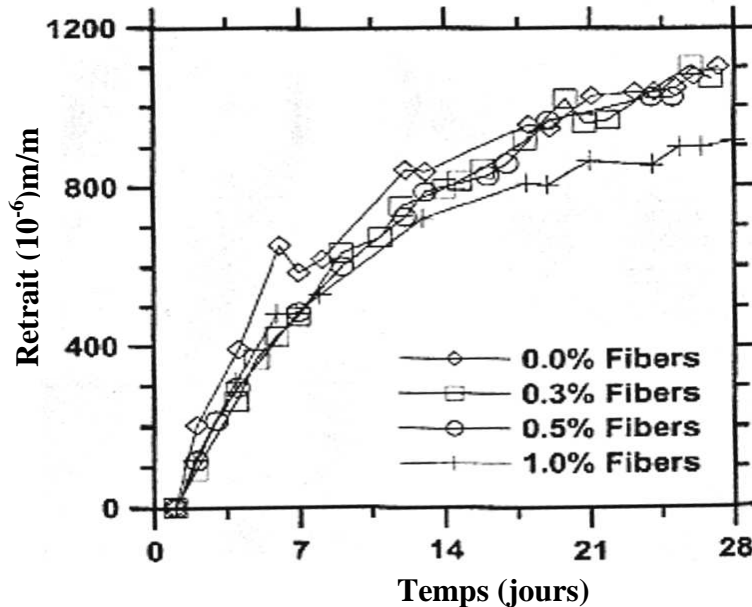


Figure 2-5 : Retrait de béton de fibres métalliques [30]

2-2-4-3. Influence de mode de conservation.

Les travaux de BARR et all. [31], montrent la diminution du retrait de béton renforcé par des fibres métalliques par rapport au béton témoin quelque soit le mode de conservation :

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

Ils ont ajouté 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 pensent que le seul facteur de variation pour cette étude est l'humidité par ce que la température est sensiblement proche pour les trois types de cure.

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

Pour mettre en évidence l'effet de la composition du béton sur le retrait, une étude entamée par BARR et all. [31] 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 ci-dessous :

Tableau (2-2) : Les différentes compositions de béton de Barr et all. [31]

Ref. N° de composition	Dosage massique des composantes (*)	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

(*) ciment : fumée de silicate : sable : gravier

Les chercheurs BARR et all. [31] montrent qu'avec la composition N°03 l'ajout des fibres 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 propre 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

2-2-4-5. Influence de blanchissement des fibres

Les études faites par MERKHOUI [1] ont montré l'effet de blanchissement des fibres végétales avec l'eau de javel d'une faible concentration sur le retrait libre : figure2-6

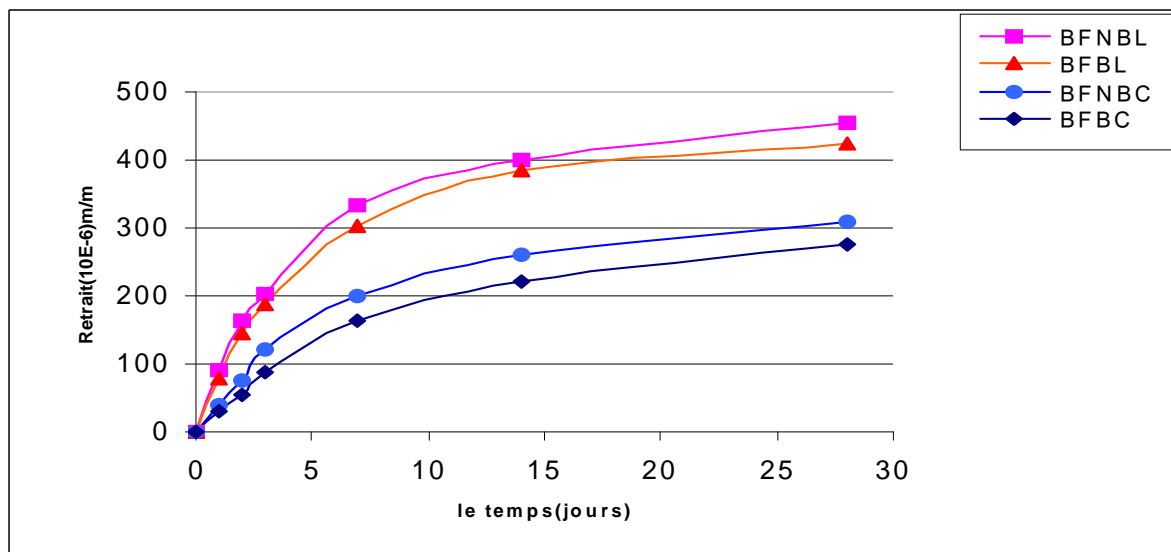


Figure2-6 : Influence de lavage des fibres de palmier sur le retrait [1]

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.

BFNBC: Béton de fibres conservées, non blanchies

BFBC : Béton de fibre avec le blanchissement et la conservation

Il a remarqué que le blanchissement diminue le retrait quelque soit le mode de conservation, MERKHOUI [1] justifie ce phénomène par le fait que le lavage augmente la cohésion entre les fibres et la matrice; il diminue ainsi un peu les pores dans les fibres ce qui réduit l'évaporation de l'eau.

2-2-5. Autres paramètres d'influence :

Outre la complexité du phénomène de retrait et les paramètres cités ci-dessus, s'ajoute une infinité de variations qui peuvent avoir lieu selon leur combinaison (simultanément ou successivement) [32], telles que :

A. Le type de ciment

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

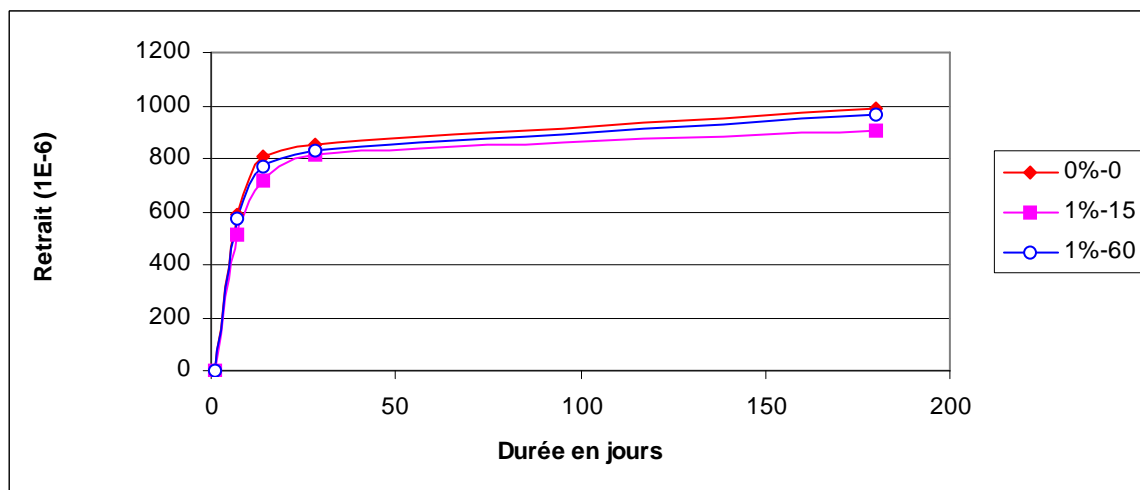


Figure 2-7 : Retrait des mortiers de fibres à base de ciment CHF conservés dans la cure CU

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 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.

B. 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 [21], 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 [21]

Auteur	Eprouvette		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	204
	25X60	6.25		Après 300 j
WELL	Ø10 X 40	2.50	démoulage après 24h conservation 7j sous des tissus humides ensuite à 65% d'humidité relative et 20°C	650
	20 X 80	5.00		490
	30 X 120	7.50		Après 300 j
	0 X 180	15.00		300
				250
				185
				150

Pour les éprouvettes de petites dimensions le retrait se développe rapidement et atteint sa valeur maximale. KEDJOUR [21] 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.

2-3. Le fluage

2-3-1. Définition

Soumis à une charge permanente, le béton subit en plus de la déformation instantanée qui se manifeste au moment de l'application de la charge, une déformation plastique se développant lentement dans le temps et que l'on appelle fluage[1,35-38], le fluage peut donc être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante[22]

Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation sous l'application d'une charge instantanée, la prise en compte du fluage est d'une importance considérable lors du calcul des structures en béton [21.22]

La distinction entre le fluage et la plasticité peut être la suivante : [21]

- Le fluage prend naissance sous des charges inférieures à la limite d'élasticité, son apparition exige une application permanente de la charge, son amplitude est fonction de la durée de la sollicitation.
- Les déformations plastiques sont également des déformations permanentes, mais elles apparaissent instantanément lorsque la charge dépasse la limite élastique du matériau.

La figure (2-8)[1,21-23,38]montre comment se comporte un béton qui serait chargé et déchargé après certain temps t.

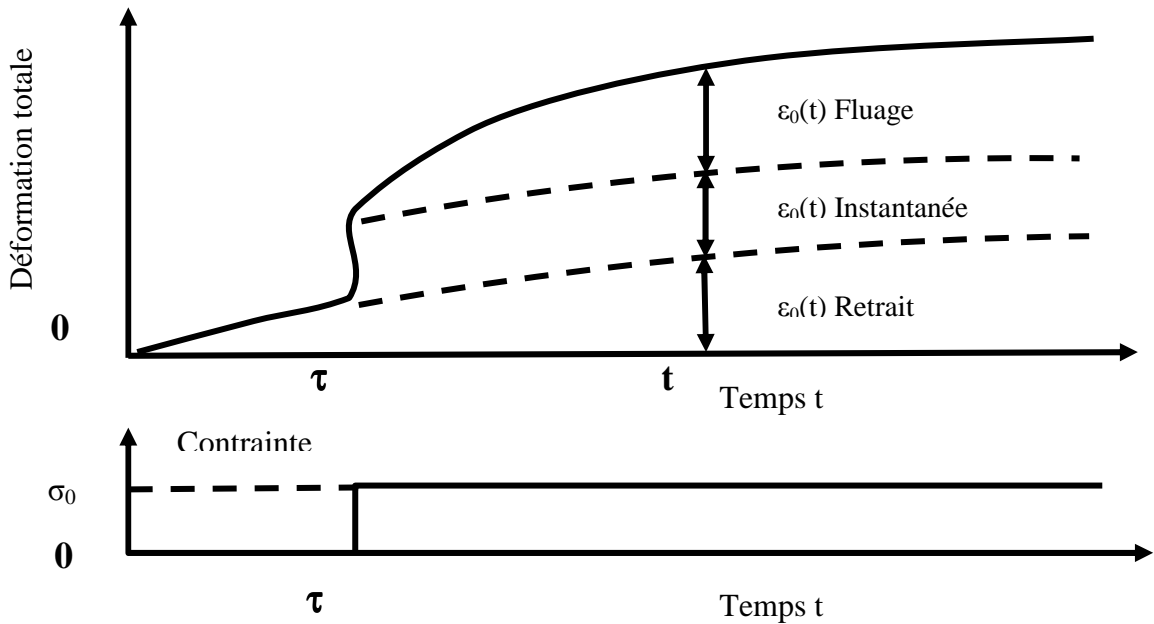


Figure2-8 : Déformations du béton [1,21-23,38]

De nombreux résultats [20 -23] nous montrent, cependant, que les deux phénomènes (le retrait, et Le fluage) ne sont pas tout à fait indépendants.

Les essais de fluage ont deux objectifs possibles [21] :

- La détermination des données nécessaires à la formulation de la loi de comportement d'un béton de position, dans ce cas, il s'agit de caractériser l'influence des principaux paramètres en faisant varier les conditions d'essai (âge de chargement, amplitude de la contrainte appliquée, conditions ambiantes)
- L'optimisation de la formulation du béton pour un ouvrage donné (en parallèle généralement avec d'autres propriétés mécaniques ou physiques, notamment avec la résistance à la compression) ; dans ce cas, il est souvent acceptable de ne pas faire des

essais que dans les conditions suivantes : très jeune âge et chargement à 28 jours, avec et sans séchage par exemple.

2-3-2. Facteurs influençant sur le fluage :

Dans la plupart des études, le fluage a été étudié de façon empirique dans le but de définir la manière pour laquelle il sera influencé par les différentes propriétés du béton [22] La difficulté dans l'interprétation des nombreux résultats disponibles vient du fait que dans la formulation d'un béton il n'est pas possible de faire varier un seul paramètre sans en modifier au moins un autre.

Certains facteurs provocateurs du fluage sont liés intrinsèquement aux propriétés du béton, dans ce cas, il faut prendre en considération que seule la pâte de ciment hydraté qui subit le fluage, d'autre facteurs viennent des conditions extérieures[22]

Plusieurs chercheurs [21-23] affirment l'impossibilité d'étudier tous les paramètres influençant le fluage en même temps, le tableau (2-4) résume les principaux paramètres acteurs du fluage.

Le tableau (2-4) Facteurs influençant le fluage [1,23]

La charge appliquée	Facteurs liés au composition du béton	Ambiance de conservation	Conditions sur les éprouvettes
-Taux du chargement, -Direction de la charge -Charge constante, -Charge cyclique..	-Type d'agrégat -Dosage en ciment -Type de ciment -Le rapport E/C -Le renforcement	-La température -L'humidité relative ambiante	-La forme : prismatique, cylindrique... -Les dimensions

2-3-2-1. Influence de la contrainte et de la résistance

Il existe une proportionnalité directe entre le fluage et la contrainte appliquée. Il n'y a pas de limite inférieure à cette proportionnalité du fait que le béton subit un fluage sous de très faibles contraintes. La limite supérieure de la proportionnalité est atteinte lorsque se développe une importante micro-fissuration. Ainsi la limite habituelle varie entre 0.4 et 0.6 de la contrainte de rupture pour le béton, atteint 0.75 dans le cas d'un béton à haute résistance [21] Dans le cas de mortier, la limite de proportionnalité se situe dans la zone 0.80 à 0.85.

Au-delà de la limite de proportionnalité, le fluage augmente avec la contrainte à une vitesse croissante, ce qui provoque la rupture avec le temps [21,23, 37]

La résistance (à la compression) du béton a une influence majeure sur le fluage [22,37], ce dernier est inversement proportionnel à la résistance du béton au moment de l'application de la charge (tableau.2-5), il est donc possible d'exprimer le fluage comme fonction linéaire du rapport (contrainte/ résistance)

Tableau (2-5) : Fluage spécifique final de bétons de résistances différentes, chargés à l'âge de 07 jours [22]

Résistance à la compression du béton [MPa]	Fluage spécifique ultime [10^{-6}]	Produit du fluage spécifique et de la résistance [10^{-3}]
14	203	2.6
25	116	3.2
41	80	3.3
55	58	3.2

La majorité du produit a autour de 3.2

2-3-2-2. Influence du taux du chargement

Les études entamées par HOUARI [23] sur une pâte cimentée renforcée par les fibres métalliques avec un pourcentage volumique de 1% et un chargement de 25, 50 et 75% de la résistance à la flexion à la première fissuration, affirment l'augmentation du fluage d'un béton renforcé avec l'augmentation du taux de chargement comme l'indique la figure (2-9)

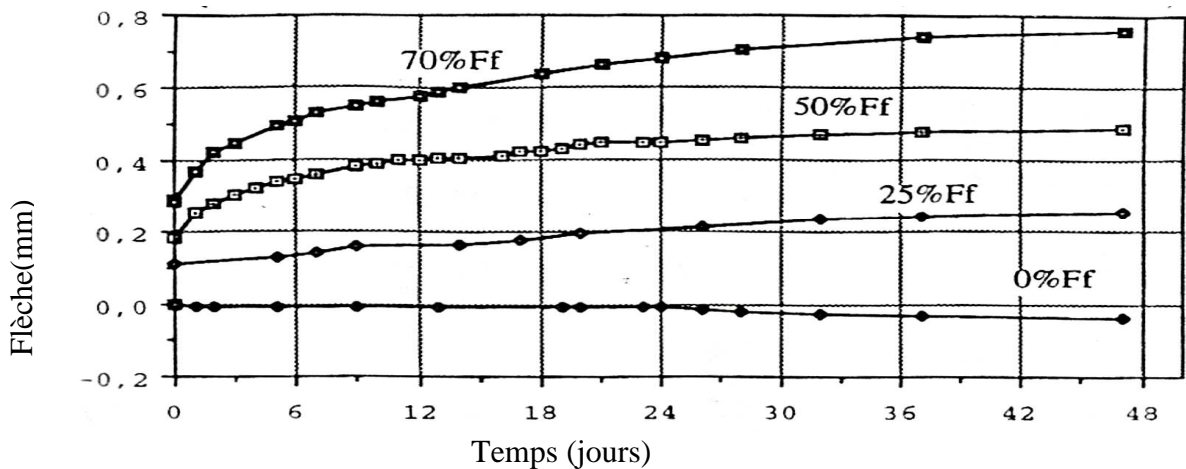


Figure 2-9 : Variation de la flèche pour différent taux du chargement

2-3-2-3. Influence de la durée de chargement :

Les études réalisées par KEDJOUR [21] sur un béton mis en charge après un mois de sa fabrication montrent :

-Pour une éprouvette maintenue constamment à l'air sec, elle aura par unité de contrainte les résultats suivants :

- Après 03 mois de chargement le fluage est de 0.005 mm/m,
- Après un an de chargement le fluage est de 0.007 mm/m,
- Après dix-huit mois de chargement le fluage est de 0.008 mm/m,

Ce qui montre l'augmentation du fluage en fonction de la durée de chargement

2-3-2-4. Influence de l'âge de chargement

L'influence de l'âge de chargement sur le fluage est en liaison avec le durcissement du béton au moment de l'application de la charge permanente [20]

le fluage diminue avec l'augmentation de l'âge de chargement[1,4,21,22]

Pour un béton conservé à l'air sec le fluage est de 0.016 mm/m si la charge est appliquée à 07 jours, et de 0.003 mm/m si la charge est appliquée à 01 ans.

2-3-2-5. Influence du renforcement par des fibres :

Dans la littérature, nous trouvons des résultats contradictoires sur l'influence du renforcement par les fibres sur le fluage, à titre d'exemple :

ELHACHEM [3] a montré que le fluage du béton ordinaire est similaire au béton renforcé par les fibres métalliques.

Alors que MERKHOUI [1] a montré que le fluage d'un béton de fibres de palmier dattier est inférieur au fluage du béton témoin.

Par contre BALAGURA et RAMAKRISHNAN [40] ont montré que le fluage d'un béton de fibres métalliques est supérieur à 15% par rapport au béton ordinaire.

HOUARI [23] justifie cette contradiction par les paramètres d'essais les plus défavorables utilisés dans les études de BALAGURA et RAMAKRISHNAN [40] (D_{max} granulat, quantité des fibres introduite, fibres longues, et niveau de chargement faible), il résulte que les fibres métalliques modifient peu le fluage de la matrice surtout pour les taux des chargements faibles mais dès que le taux atteint 50% les fibres diminuent le fluage.

2-3-2-6. Influence de l'humidité relative

L'humidité relative de l'air ambiant est l'un des paramètres externes qui a le plus d'influence sur le fluage, pour un béton donné, le fluage est d'autant plus important que l'humidité relative soit basse [20-23] La figure2-10 illustre le comportement d'éprouvettes mûries à une humidité de 100% puis chargées et exposées à différents taux d'humidité.

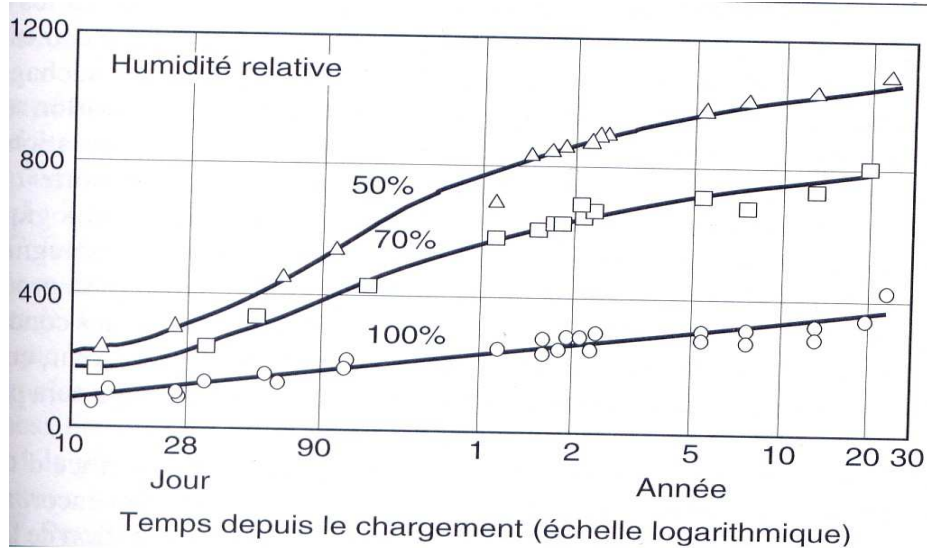


Figure2-10 : Influence de l'humidité relative [20]

Le fluage comme le retrait, augmente pour le béton conservé en hygrométrie sèche KEDJOUR [21] a trouvé que : le même béton soumis au même âge à une contrainte identique, atteindra un fluage de 0.08 mm/m pour une conservation à l'air sec, et de 0.002 mm/m pour une conservation à une ambiance humide.

2-3-2-7. Influence de la dimension de l'éprouvette

Le fluage est d'autant plus important que l'élément ait une faible section D'après les études de THEODORAKPOULOS [41] sur les plaques de mortiers renforcées par les fibres de verres (50 %), ces résultats montrent que le fluage sur des plaques ayant une épaisseur de 16mm est inférieure à celles ayant une épaisseur de 11mm. En augmentant les dimensions d'une éprouvette du simple au double, le fluage est réduit de 10 à 30%[21] Le tableau (2-6) donne les conditions et les résultats de quelques essais relatifs à l'influence de la dimension sur le fluage, effectués par différents auteurs.

Tableau 2-6 : Caractéristiques des essais de l'influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait du béton [21]

Auteur	Eprouvette		Conditions d'essais	Fluage μ /m	
	Dimension en cm	Rayon moyen en cm		Après 300 j	Après 500j
DAVIS	Ø15	3.75	Conservé pendant long durée à 100% d'humidité relative.	260	275
	Ø20	5.00		-	245
	Ø25	6.25		160	170
DELARUE	12X12X100	3.00	Chargé à 28j à 120 Kg/cm ²	Après 28 j	Après 400 j
	15X15X100	3.75		165	295
	17X17X100	4.25		145	275
KARAPETIAN	14X60	3.50	Chargé à 28j à 10 Kg/cm ² conservation un mois dans la sciure humide ensuite à 50% d'humidité relative et 20°C	Après 300 j	Après 500j
	25X60	6.25		230	240
				180	200

2-3-2-8. Influence de l'élancement des fibres

Suivant les essais de fluage réalisés sur le béton de fibre métallique [42], une diminution remarquable des déformations en fluage, en fonction de l'augmentation de leur élancement. En effet, pour un dosage fixe en fibres (dosage en volume 0.5%), plus leur élancement est élevé, plus le taux de fluage diminue.

2-3-3. Autres paramètres d'influence

A. Influence du blanchissement des fibres

La figure 2-11 résume les travaux de MERKHOUI [1] sur le béton renforcé par les fibres de palmier dattier pour avoir l'influence de lavage des fibres sur le fluage, il a trouvé comme résultat que le lavage a une faible influence (variation prise égale à 6.82%)

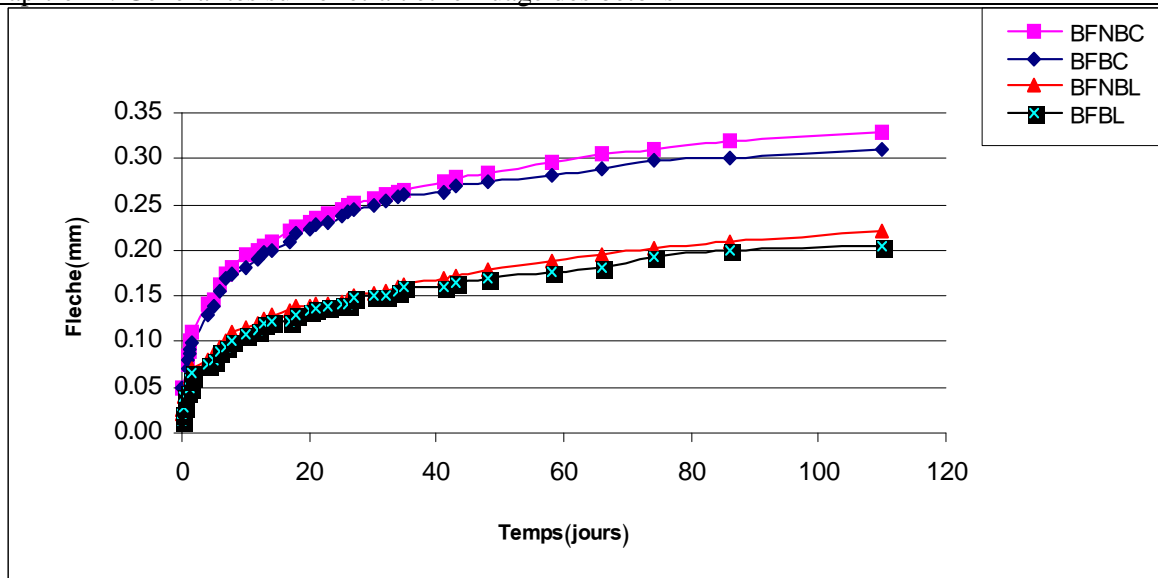


Figure 2-11 · Influence de lavage des fibres pour différents milieux de

Pour la dénomination : BFNBC, BFBC, BFNBL, BFBL voir paragraphe 2-2-4-5 de même chapitre

B. Influence de la température

L'influence de la température sur le fluage présente un grand intérêt dans le cas de certains types de structure [22-43], le taux de fluage augmente avec la température jusqu'à environ de 70°C. A cette température, pour un béton où le rapport (eau/ciment) est de 0.60, le taux de fluage est environ 3.5 fois plus élevé qu'à 21°C. Il est possible qu'une partie de l'augmentation du fluage du béton chargé à haute température soit due à la plus faible résistance du béton à température élevée.

Pour les températures comprises entre -10°C et -30°C, le fluage observé est égal à environ la moitié de celui à 20°C

C. Le chargement statique et le chargement cyclique

La plupart des résultats d'essais sur le fluage ont été obtenus sous une contrainte maintenue constante, mais dans quelques cas, la charge réelle oscillait entre certaines limites. Des résultats expérimentaux [20,22] montrent qu'une charge varie autour d'une valeur moyenne du rapport (contrainte/ résistance) provoque une déformation différée plus grande qu'une charge constante correspondante au même rapport(contrainte/ résistance)

La déformation sous charge cyclique est probablement causée par le même mécanisme que le fluage sous charges statique, il est possible que le chargement cyclique induit un taux de fluage plus élevé à court terme et conduit à des valeurs supérieures à long terme.

D. Influence des granulats

La granulométrie, la dimension maximale et la forme des granulats sont des paramètres supposés provocateurs de fluage [22], leurs principes d'influence sont liés à leur effet direct ou indirect sur la quantité de granulat dans la composition pour que les bétons soient serrés (compact)

Certaines propriétés physiques des granulats influencent le fluage : le module d'élasticité est le plus important. Plus il est élevé, plus le gêne ou la limitation provoquée par les granulats est importante sur le fluage.

2-4. Conclusion

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

Bien que les fibres accélèrent un peu le départ de l'eau, le retrait des bétons et les mortiers renforcés par les fibres diminue, 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 suivant :

Tableau 2-7 : 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, a 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 diminue 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.

Dans ce chapitre nous avons donné aussi les principaux paramètres qui influencent plus ou moins sur le fluage.

Comme le retrait, le fluage du béton est un phénomène très complexe qui dépend de nombreux facteurs. D'après plusieurs chercheurs, il est difficile de les prendre tous en considération. Les principaux paramètres que nous avons cités dans ce chapitre sont regroupés dans ce tableau.

Tableau 2-8 : Résumés des observations sur les paramètres qui influencent le fluage

paramètres	Observations sur l'influence
Facteurs liés aux sollicitations	Augmentation du fluage en fonction de : - L'augmentation du taux et de la durée du chargement, -Le chargement cyclique par rapport au chargement statique pour un même rapport (contrainte/résistance). Diminution du fluage avec : -Augmentation de la résistance du béton, -Augmentation de l'âge de chargement
Facteurs liés à la formulation du béton :	Diminution du fluage avec l'incorporation des fibres
Facteurs liés à l'histoire de la conservation	Augmentation du fluage avec : -La diminution de l'humidité relative. -Augmentation de la température
Facteurs liés à la conception des corps d'épreuve :	Augmentation du fluage avec : -Diminution des dimensions de l'éprouvette. -Diminution de l'élancement des éprouvettes.

Chapitre III

GENERALITES SUR LA MODELISATION DES RETRAITS ET DES FLUAGES

Généralités sur la modélisation des retraits et fluages

3-1.Introduction

Le calcul des structures et l'analyse des phénomènes complexes dans le domaine de génie civil (exemple : fluage, retrait, fatigue...) se ramène toujours à un problème d'algèbre linéaire 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. [44 -50], mais avant de calculer, il faut modéliser le comportement, en se basant sur des discrétisations ou bien sur des observations empiriques après plusieurs itérations (répétition).

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...)

Les centres de recherches et d'études demeurent les investigateurs attirés des progrès accomplis. [51]

Dans la littérature, on trouve de nombreux modèles pour décrire le retrait et le fluage du béton ordinaire [21-23, 34, 36,39-43-61] 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 rhéologiques (le retrait et le fluage) 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 du fluage du béton de fibre.

3-2. Définitions

3-2-1. Le modèle

Le mot modèle possède plusieurs définitions [44-46] nous citons par exemple [44] :

- Une représentation en petit de ce qui sera en grand ;
- Exemple à imiter ;
- Représentation simplifiée, d'un système ou d'un processus, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir ;
- Avoir une forme analytique représentative du phénomène physique ou mécanique.

3-2-2. Etapes de construction du modèle

La production d'un modèle exige le respect des étapes suivantes : [44]

1. Position du problème et définition de l'objectif.
2. Description physique qualitative du phénomène (compréhension avec lecture ou l'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.
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 [44,47], c'est la meilleure représentation de ce dernier.

La distinction entre le modèle physique [44,45] et le modèle mathématique [46,48] 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 [44, 46,48] permet l'évaluation et de la description quantitative du phénomène physique.

Généralement l'objectif principal de la modélisation est la :

- Prédiction des évènements futurs pour une meilleure sécurité et des conditions économiques favorables
- 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

[44]

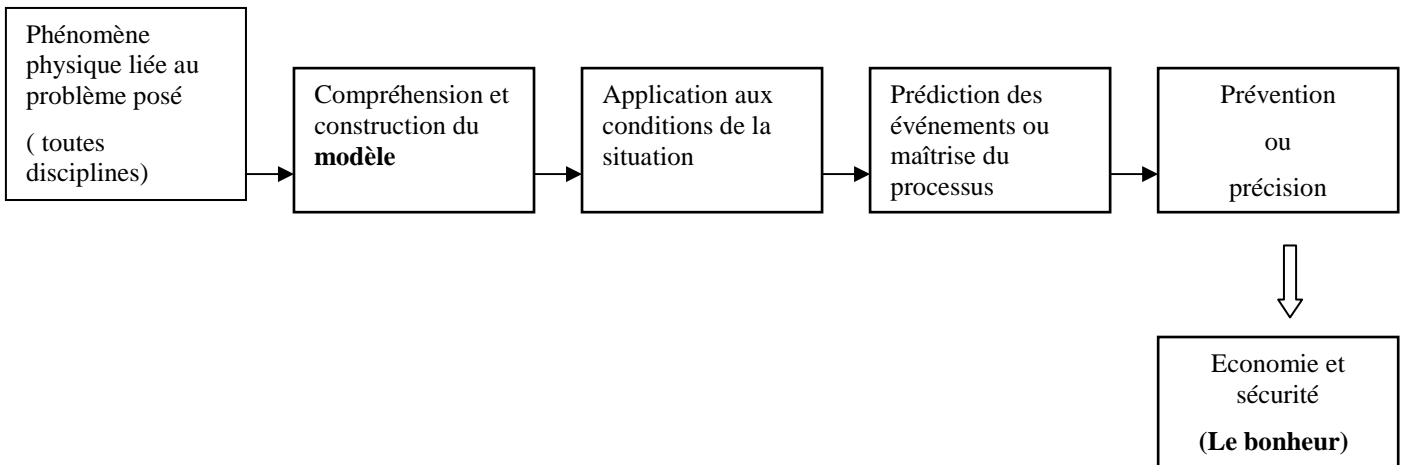


Figure 3-1 : Schéma du principe logique à la base de la recherche des modèles

HAFSI [44] a résumé dans la figure (3-2) le principe d'évolution dans la compréhension du phénomène afin d'établir un modèle.

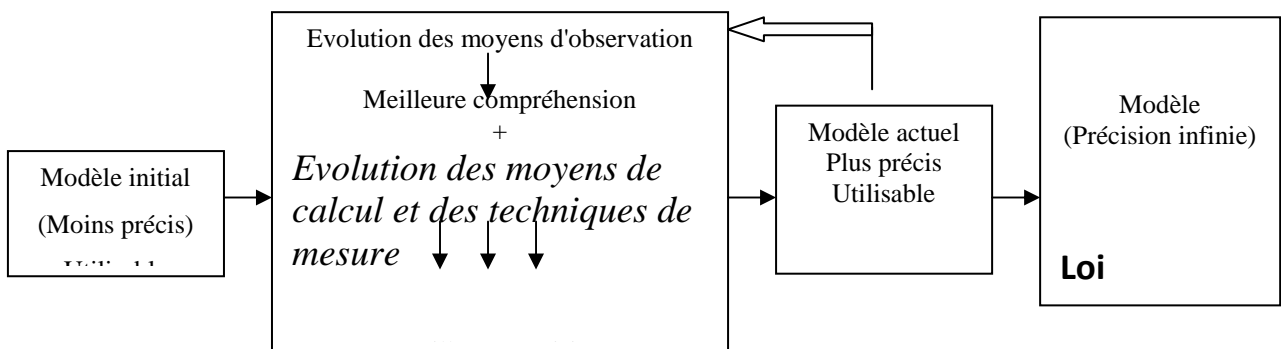


Figure 3-2 : Schéma de l'évolution du modèle vers la loi

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 des phénomènes rhéologiques 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 ordinaux et de fibres.

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

3-3-2-1. Forme analytique du retrait suivant la théorie de 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 granulat), ainsi que sa phase fluide.

Dans ce qui suit, nous exposons la théorie de KEDJOUR [21]

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 donné 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 [21], 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 [21] 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 proportionnel 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 et qui varie entre 1.5 et 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, [21] 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 [22])

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 devient :

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

Avec : t compris entre 1 et 3 jour.

3-3-2-3. Le modèle BP (Bazant et Pannula) [23]

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.
- 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 Kelvin

T₀ : 273 K

3. La fonction de l'âge C(t)

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

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

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 = 10mm/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 : t₀ temps initial en jour correspond à la première lecture

6. Fonction de l'humidité ambiante Kh

$$Kh=1-eh^3 \quad eh \leq 0.98 \quad (3-29)$$

$$Kh= -0.2 \quad eh=1.00$$

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 :

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

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

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

D'où on obtient :

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

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 :

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

Avec :

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

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

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 [53]

Pour acquérir de la connaissance concernant le problème de prédiction de retrait et du fluage 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). Les conditions ambiantes variables considérées présentes en Belgique. 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 et fluage du béton.

Le tableau (3-1) montre les paramètres pris en considération pour chaque modèle [53]

Tableau 3-1 : Les variables des modèles EC2 et B3 respectivement [53]

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 utilisés[53]

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[53]

Type de béton	Le modèle EC2	Le modèle B3
A1	51.3	65.5
A2	53.9	58.3
A3	65.5	63.2
ϖ_{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

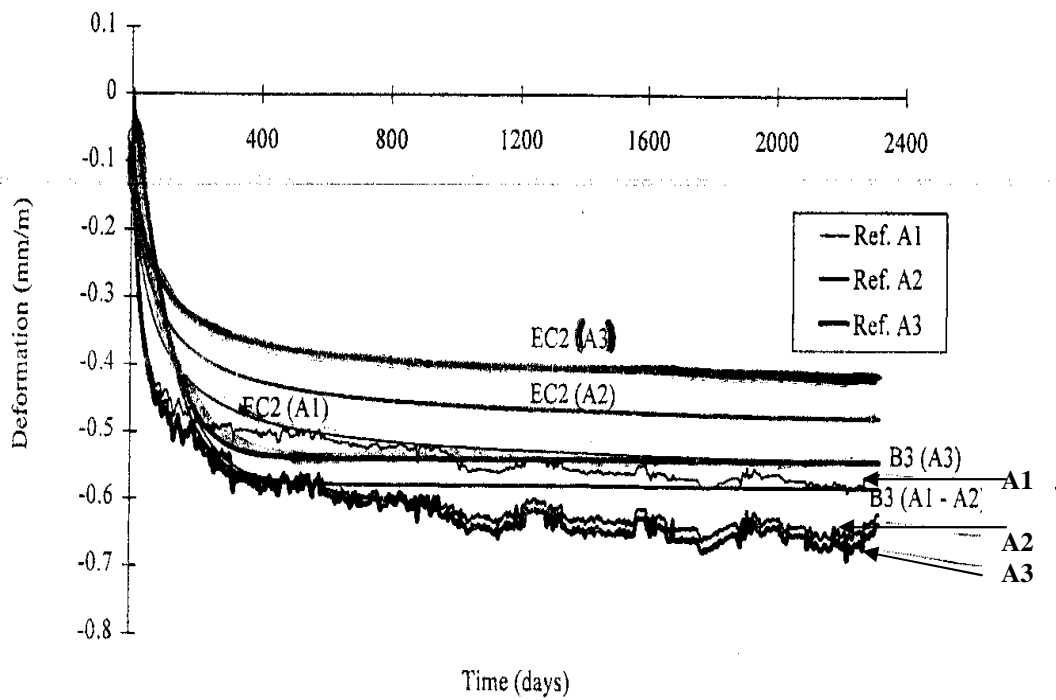


Figure 3-3 : le retrait de béton pour les mesures expérimentales et de modèles ACI et B3[53]

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 [54], 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 :

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

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 (μ m/m/C°)

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(μ m/m°C)	87	80	61	50	25	21	15

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

$$\epsilon_r(t) = \epsilon_{tot} - \epsilon_{(n)} \quad (3-45)$$

Avec :

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

où :

ϵ_{tot} : la déformation totale

$\epsilon(n)$: 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)

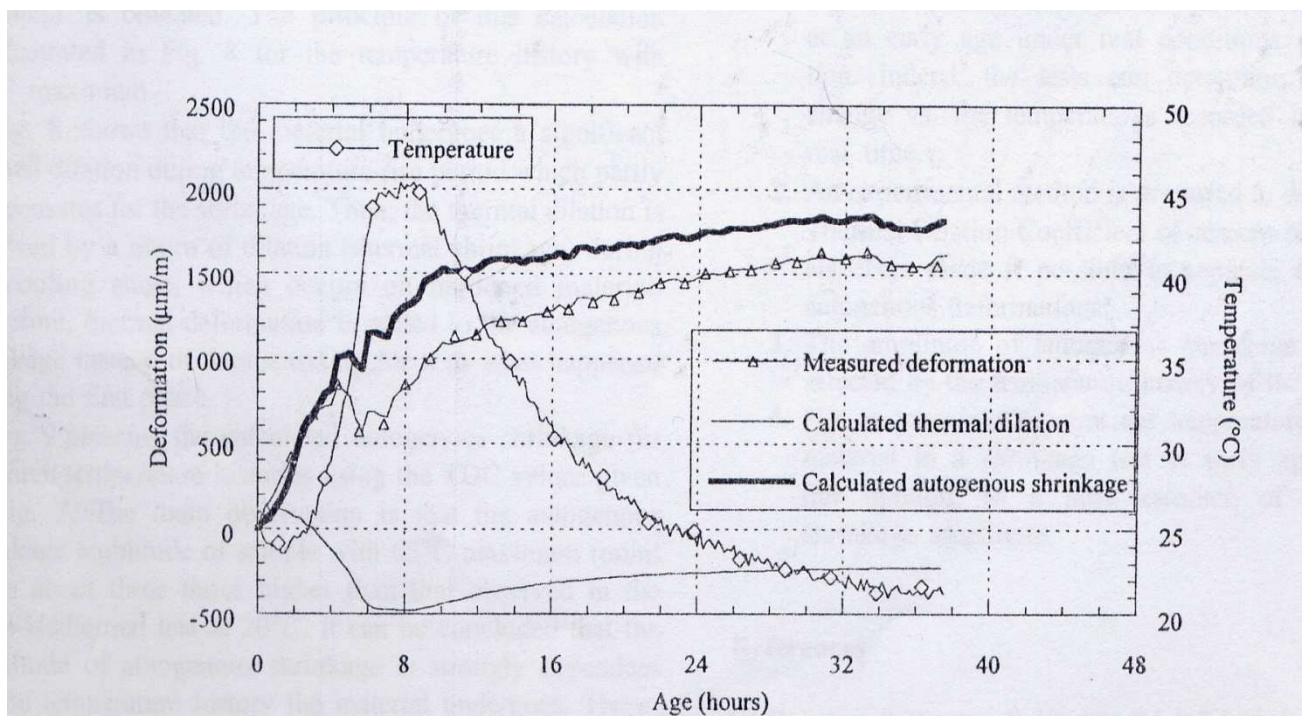


Figure 3-4 : Séparation de déformation thermique et du retrait [54]

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

D'après [55], 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, puis le calcul comme une fonction linéaire du degré d'avancement jusqu'à 28 jours, et enfin par une lente évolution exponentielle :

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

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

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

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

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

$r(t)$ est 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

D'après [56], et vu le manque des normes relatives au béton de sable, une étude comparative faite par BENAÏSSA et VIGUIER pour situer les déformations différées par les règlements en vigueur (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.

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 :

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

Où :

A_c : aire de la section de la pièce.

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

ϵ_{s2} Se lit sur le graphique de la figure e.5 du code CEB-FIP.

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)

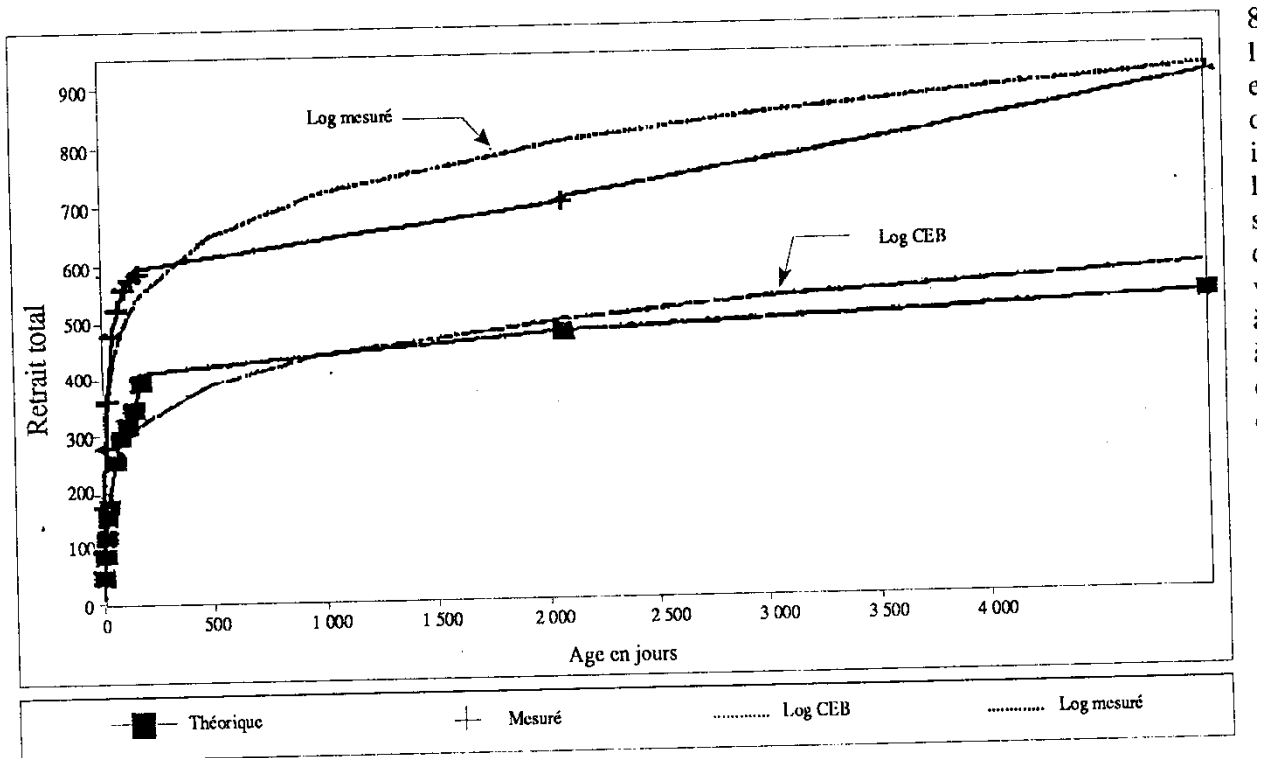


Figure 3-5 : Estimation de la compatibilité retrait CEB-FIP –retrait expérimental [56]

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

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

$$A=525$$

$$B=-2.5$$

$$C=-0.5$$

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

3-3-2-9. Autres modèles de retrait

Plusieurs équations permettant de calculer le retrait ont été étudiées par NEVILLE et COLL. [22] et peuvent servir à estimer le retrait à long terme à partir de mesure à court terme sur un béton donné.

Une méthode pour mesurer le retrait à court terme est décrite dans la norme BS 1881 : partie 5 : 1970[22] 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 [21] ACKETT, 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 all [57,58] 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 meures s'effectuent à l'aide d'une microscopie optique

D'après [59], une discrétisation d'une forme aléatoire de treillis est utilisé 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 [60], une modélisation numérique du retrait propre de la pâte du 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, le programme de la simulation numérique que HYMOSTRUC, d'après [60] a utilisé. 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, 23]

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-Etapes 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:

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

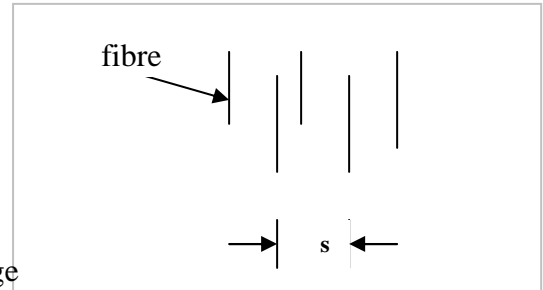
d : le diamètre de la fibre

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):

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

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. Déduction de retrait libre (ε_{fs})

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

3-3-3-2. Modèle proposer par Hacène HOUARI

L'expression proposée par HOUARI [23] 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} .

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

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

En se basant sur le modèle de Mangat et Azari, HOUARI [23] 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

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

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

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

3-3-3-3. Modèle de YOUNG et CHERN

D'après [23], 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 :

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

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 :

$$\Phi \left(V \cdot \frac{l}{d} \right) = \alpha \left(1 - \exp. \left(-\beta V \frac{l}{d} \right) \right) \quad (3-67)$$

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. [31] 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 [31] 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 de 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 :

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

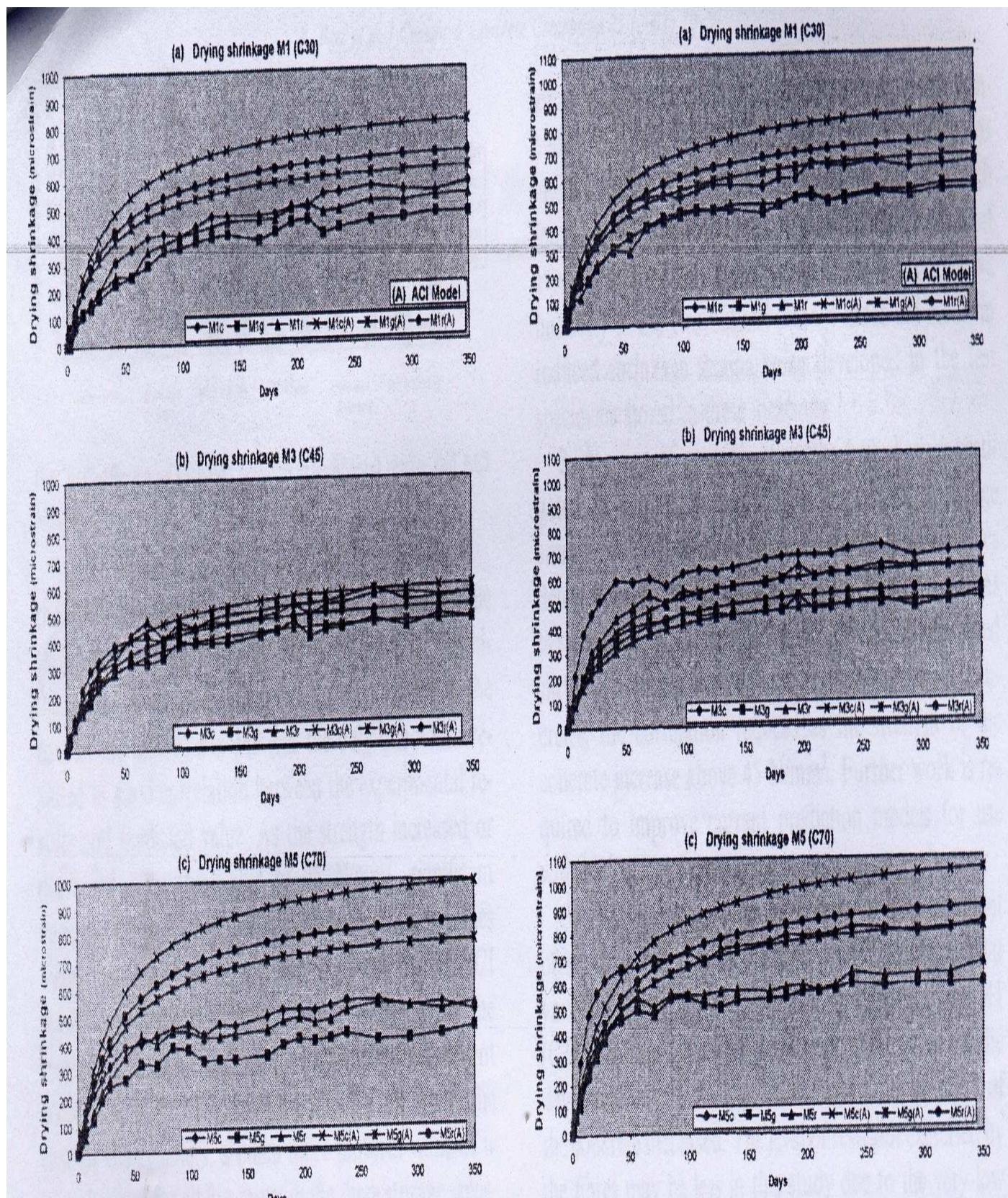
Où :

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)



A- éprouvettes prismatiques

B- éprouvettes cylindriques

Figure 3-6 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et du modèle ACI[31]

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).

3-4. Modélisation du fluage

3-4-1 Introduction

Il existe encore à l'heure actuelle de nombreux modèles concernant le fluage du béton et les mortiers ordinaires ou renforcés par les fibres métalliques, cette partie regroupe en détail certaines modèles de la littérature.

3-4-2 Modélisation du fluage d'un béton non renforcé

3-4-2 -1. Modèle de ROSSE et LORMAN

D'après [21], les résultats d'essais effectués au laboratoire de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, permettent de considérer l'existence d'une valeur limite du fluage.

ROSSE assimile la partie terminale de la courbe (très plate) à une hyperbole de la forme :

$$F(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (3-70)$$

Où:

F(t) est le fluage au temps t

t est le temps en jours

a et b sont des coefficients

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\frac{a}{t} + b} \right) = \frac{1}{b} \quad (3-71)$$

On obtient 1/b en transformant l'équation hyperbolique $t/F = a + bt$.

ROSSE a calculé les valeurs de t/F pour les éprouvettes chargées à 7 jours et en fonction de temps, il a obtenu l'équation d'une droite ayant pour ordonnées à l'origine, la valeur a. La pente est égale à $b = \tan \alpha$

Ainsi la valeur limite peut être trouvée d'une manière simple et précise à l'aide de la formule de **LORMAN**.

$$F(t) = F_{s\infty} \frac{t}{n+t} \sigma \quad (3-72)$$

Où

$F_{s\infty}$: le fluage spécifique final

n : le moment (en jours) où la mesure du fluage final aura atteint 50% de sa valeur

σ : la contrainte en compression appliquée en kg/cm^2

La figure (3-7) présente le fluage en fonction du temps sur des éprouvettes chargées à 7 jours sous des contraintes de 50,100, 125 kg/cm^2 et conservées à 50 % d'humidité relative. Pour chaque contrainte, il a été tracé les courbes obtenues à partir des équations de ROSS et de LORMAN. Il a été remarqué qu'il est impossible de faire coïncider l'équation de LORMAN avec les résultats d'essais à 125 kg/cm^2

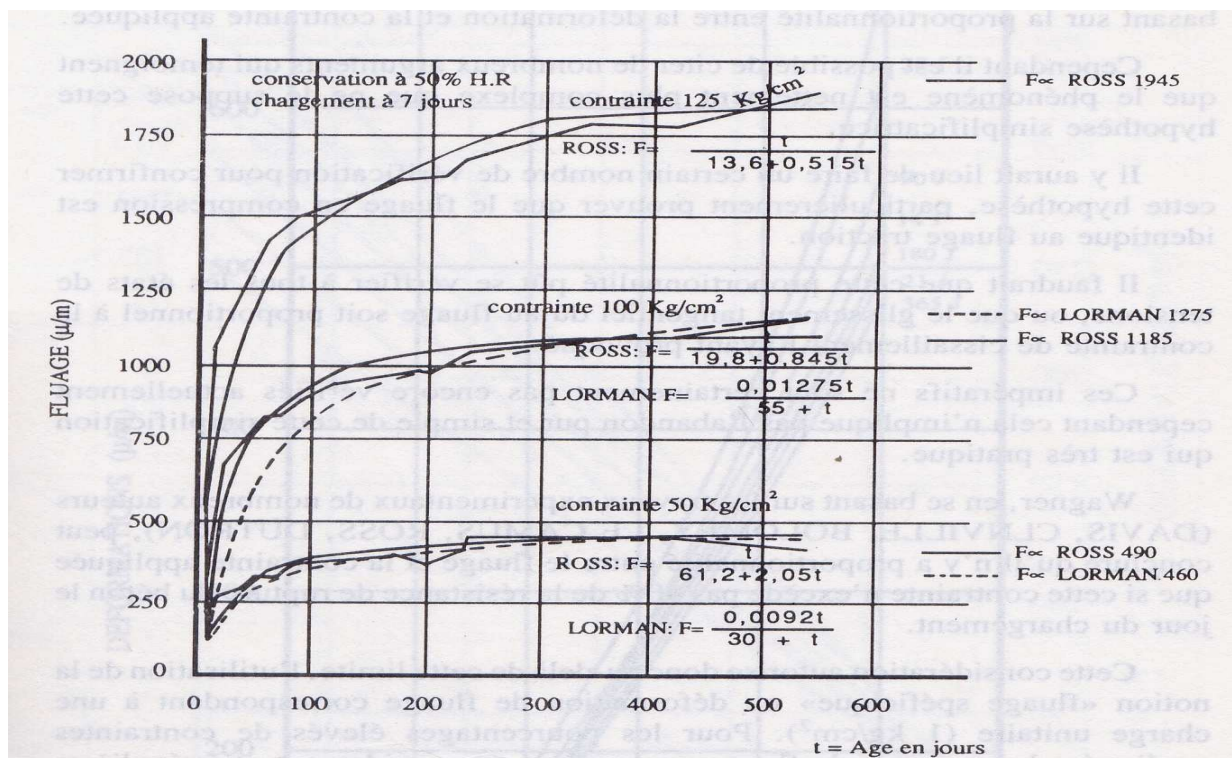


Figure 3-7 : Comparaison entre les courbes expérimentales et les courbes théoriques

3-4-2-2. Modèle LOUKILI

D'après [7], Loukili a remarqué que :

- Après traitement thermique le fluage est réduit
- Pour le béton à haute performance (BHP) la fonction d'évolution du fluage $f(t-t_0)$ dépend de $(t-t_0)$
- le fluage propre spécifique a pour expression :

$$\varepsilon_s = K(t_0) \cdot f(t-t_0) + h(t_0) \quad (3-73)$$

avec:

$$K(t_0) = 19 \exp. \sqrt{\frac{0.1}{t_0 - 2.65}} \quad (3-74)$$

$$f(t-t_0) = \frac{\sqrt{\frac{t-t_0}{3t_0-5}}}{1 + \sqrt{\frac{t-t_0}{3t_0-5}}} \quad (3-75)$$

$$h(t_0) = 18 \exp. \sqrt{\frac{0.2}{t_0 + 1.2}} \quad (3-76)$$

3-4-2 -3. Estimation du fluage de béton de sable [56]

Les détails expérimentaux sont déjà cités au paragraphe (3-3-2-7 : Estimation du retrait de béton de sable), par la suite nous allons donner quelques modèles de fluage relatif au béton de sable.

Modélisation du CEB-FIP

Suivant le CEB-FIP le fluage s'exprime par :

$$\varepsilon(t, t_0) = \sigma_0 / E_{c28} \cdot \varphi(t, t_0) \quad (3-77)$$

Avec :

σ_0 : Contrainte constante appliquée au jour t_0

E_{c28} : module d'élasticité du béton à 28 jours

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_d \cdot \beta_d(t - t_0) + \varphi_f [\beta_f(t - t_0)] \quad (3-78)$$

Où :

φ_d : Coefficient d'élasticité forfaitaire pris en général égal à 0.4

$\beta_d(t - t_0)$: Coefficient d'élasticité tracé sur le graphique du code CEB-FIP

$\beta f(t - t_0)$ Est la fonction de la déformation plastique différée (fluage)

ϕf Coefficient correspondant à la plasticité différée, il est donné par l'expression :

$$\phi f = \phi f_1 \cdot \phi f_2 \quad (3 -79)$$

où :

ϕf_1 : dépend du milieu ambiant et se détermine sur la courbe du code CEB-FIP

ϕf_2 : dépend de l'épaisseur fictive et se détermine sur la courbe e.2 du CEB-FIP

Les déformations du fluage du même béton sont modélisées suivant la norme BPEL.

L'ensemble des résultats réglementaires (CEB et BPEL) et expérimentaux sont illustrés par les courbes de la figure (3-8)

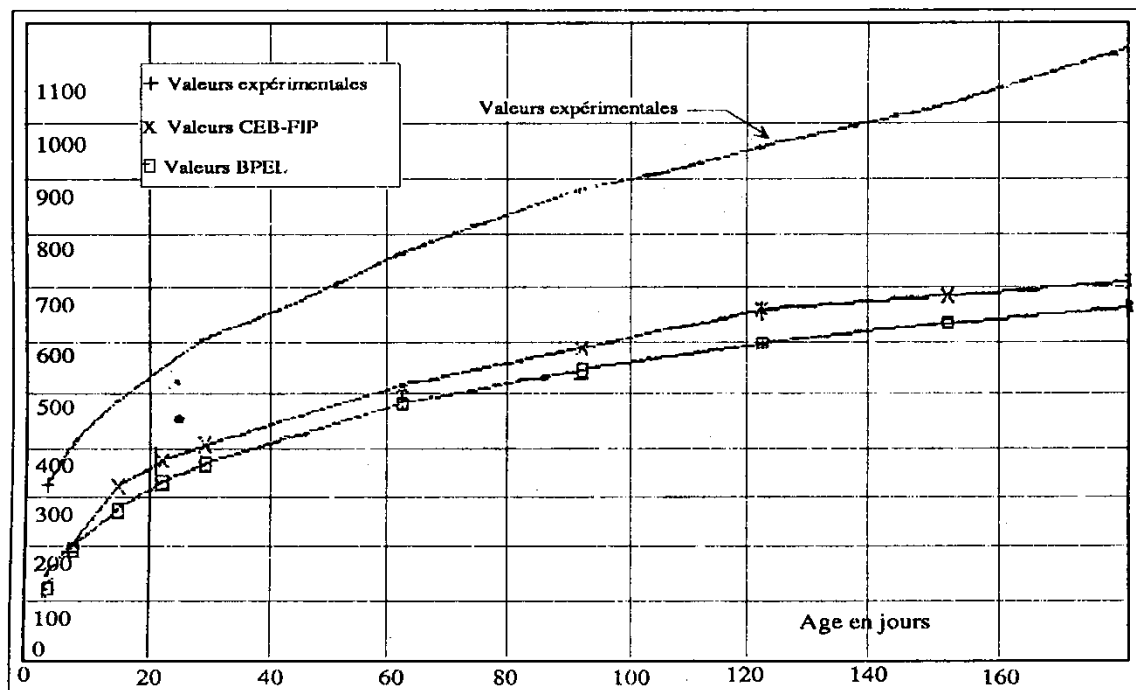


Figure 3-8 : Estimation de la compatibilité fluage CEB-FIP-BPEL.Fluage

Le modèle CEB-FIP et BPEL fournissent des résultats très voisins. Ces règlements sous-estiment les valeurs de fluage du BS d'un taux allant de 35% (à 3 jours) à 40% en fin d'essai (6 mois), il faut donc introduire des coefficients de majoration dans les règlements en vigueur.

3-4-2 -4. Les modèles Eurocode2 (EC2) et le modèle B3 du ACI 209 [31]

Nous avons donné au paragraphe 3-3-2-4 de ce chapitre quelques détails concernant les deux modèles B3 du ACI 209,
 Pour le fluage le tableau (3-8) montre les paramètres pris en considération pour chaque modèle.

Tableau 3-8 : Les variables prises en considération pour les modèles EC2 et B3

le modèle	EC2	B3
Résistance à la compression	x	x
Dosage du ciment	-	x
E/C	-	x
Eau de gâchage	-	x
Agrégat/ciment	-	x
Type de ciment	x	x
Section transversale	x	x
Type de l'éprouvette	-	x
humidité relative	x	x
Age du béton au cours du chargement	x	x
Age du béton au début de la prise	-	x
Condition de la cure	-	x

Avec x : pris en considération, - : non

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

Les compositions des trois types de béton (A1, A2 et, A3) utilisés pour la modélisation du fluage sont données sur le tableau (3-2) de ce chapitre.

Dans le même paragraphe du chapitre on peut avoir les formules de calcul du coefficient de comparaison, entre le modèle et les données expérimentales

La statistique d'erreur et la comparaison des résultats d'essais pour le modèle EC2 et B3 sont données sur le tableau (3-9)

Tableau 3-9 : Coefficient de variation d'erreurs (en %) pour le fluage des bétons A1, A2 et A3

Type de béton	Le modèle EC2	Le modèle B3
A1	30.1	10.9
A2	24.0	12.2
A3	6.6	17.7
$\bar{\omega}_{tot}$	22.6	13.9

Une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs des deux modèles montre que :

- Dans l'EC2 - Model le développement du fluage est décrit au moyen du coefficient du fluage $\phi(t, t')$; de l'autre côté le modèle B3 utilise la fonction de l'acquiescement $J(t, t')$
- Le coefficient du fluage $\phi(t, t')$ devrait être calculé au moyen d'expression suivante:

$$\phi(t, t') = E(t')J(t, t') - 1 \quad (3 - 80)$$

où

$E(t')$: est le module élastique

$J(t, t')$ est défini par le modèle B3

$$J(t, t') = [1 + \phi(t, t')]E(t') \quad (3 - 81)$$

- La courbe qui correspond au coefficient du fluage est donnée sur la figure 3-9

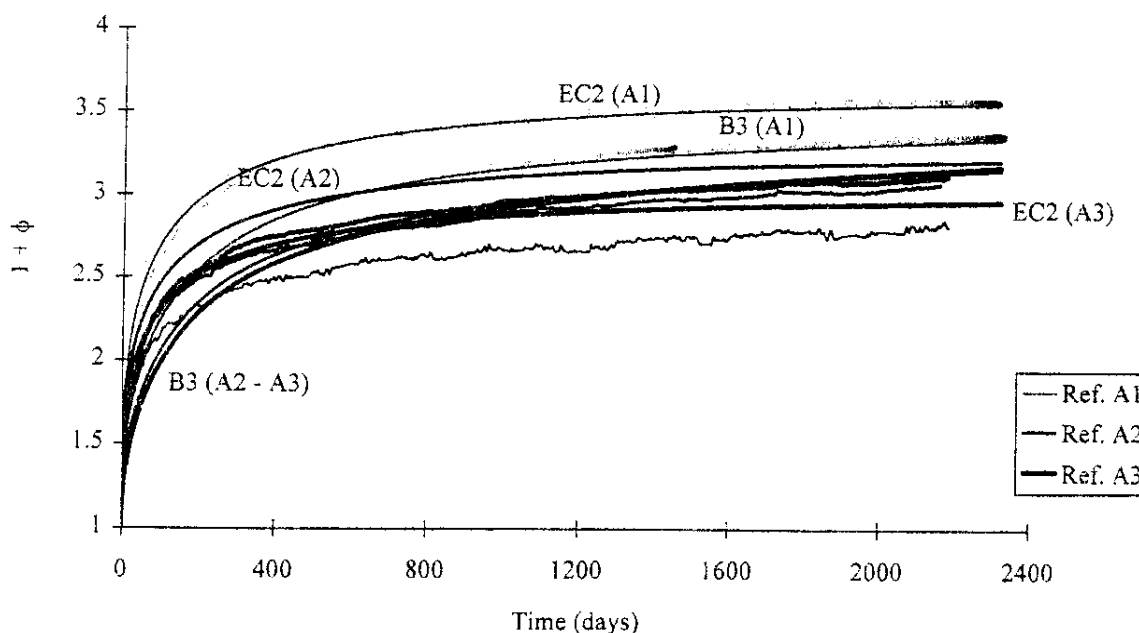


Figure 3-9 : Comparaison des résultats expérimentaux et de la modélisation du fluage

La figure 3-9 montre que :

- La tendance du coefficient du fluage, est presque la même pour les bétons A2 et A3. , c'est la même remarque que l'épreuve du retrait,
- Le modèle B3 prédit presque la même tendance de ϕ pour A2 et A3. Au-dessus de 500 jours la ressemblance entre les mesures et le modèle est extrêmement bonne. Avant cela, une sous-estimation est remarquée pour le modèle B3;
- Les deux modèles : EC2 et B3 surestiment le coefficient du fluage. Cependant, la déviation du modèle B3 est plus petite que le modèle EC2 - correspondant;
- L'accord entre la prédiction et les valeurs mesurées est meilleur pour le fluage que pour le retrait comme le montrent les tableaux (3-3) et (3-9)

3-4-2-5. Autres modèles du fluage

Plusieurs chercheurs donnent des expressions empiriques de fluage, parmi lesquelles on peut citer brièvement, d'après KEJOUR [21]:

L'expression d'AROUTOUNIAN:

$$F(t) = C(\varphi) (1 - e^{-y(t-\varphi)}) \quad (3 -82)$$

Avec :

$$C(\varphi) = (F_{\infty} + A_1) / \varphi \quad (3 -83)$$

Où : F_{∞} : est le fluage final

t : est la durée de chargement

φ : l'âge de chargement.

A_1 et y : des constantes dépendant du béton

L'expression de DISCHINGER :

$$F(t) = F_{\infty}(1 - e^{-xt}) \quad (3 -84)$$

Où :

F_{∞} : est le fluage final

x : étant un facteur dépendant du béton

t : le temps en années

L'expression d'ERZEN:

$$F(t) = A e^{\alpha} (1 - (a/t)^{\beta}) \quad (3 -85)$$

Où : a : est l'âge du béton au moment de la mise en charge

α et β : deux constantes caractéristiques du béton.

A : est un paramètre à déterminer expérimentalement

L'expression de FRIEDRICH :

$$F(t) = F_{\infty} \frac{\sqrt[4]{t}}{1400} \quad (3 -86)$$

Où : t : est exprimé en jours.

L'expression de LEE :

$$F(t) = A (1 - e^{-K(t)}) \quad (3 -87)$$

Où : K et A : sont des valeurs à déterminer expérimentalement.

L'expression de MAC HENRI :

$$F(t) = \alpha (1 - e^{-rt}) + \beta e^{-pK}(1 - e^{-mt}) \quad (3 -88)$$

Où : K : est l'âge au moment de l'application de la charge et α , β , r, p, m, sont des facteurs qui dépendent de la composition du béton.

L'expression de SHANK :

$$F(t) = Ct^{1/a} \quad (3 -89)$$

Où : F(t) : est la mesure du fluage spécifique au moment t.

t : est le temps en jours

C et a : sont des facteurs à déterminer expérimentalement

L'expression de THOMAS :

$$F(t) = F_{s \infty} \sigma (1 - e^{-A((t+a)x-ax)}) \quad (3 -90)$$

Où :

σ : est la contrainte appliquée

t : est le temps par mois

A, a et x : sont des facteurs dépendant des conditions d'essais et de la composition du béton.

3-4-3. Modèles du fluage pour le béton renforcé par les fibres

3-4-3-1. Modèle de SHEKARCHI-DEBICKI

D'après [23], Le modèle de SHEKARCHI-DEBICKI est basé sur le calcul du BPEL, selon cette norme le fluage est donné en fonction du temps par la formule :

$$\varepsilon_f(t) = \varepsilon_{ic}(t) \cdot K_f(t_1) \cdot f(t-t_1) \quad (3-91)$$

$$f(t-t_1) = \frac{\sqrt{t-t_1}}{5\sqrt{rm} + \sqrt{t-t_1}} \quad (3-92)$$

$$\varepsilon_{ic}(t) = \frac{\sigma(t)}{Ei28}$$

Le coefficient de fluage $K_f(t_1)$ est donné par :

$$K_f(t_1) = K_s (K_e + K_c \cdot K(t_1)) \quad (3-93)$$

où :

$$K_s = \frac{1}{1 + 20e_s}$$

K_s dépend du % d'armatures adhérentes

$$e_s = A_s/A$$

A : section de béton ; A_s la section d'armature

$$K_e = 0.40$$

K_e : est la limite inférieure du coefficient du béton.

$$K_c = \frac{120 - eh}{30} + \frac{2}{3} x \frac{100 - eh}{20 + rm}$$

$eh = 100$ le pourcentage d'humidité relative

rm : rayon moyen de la pièce

$$K(t_1) = \frac{100}{100 + t_1} \text{ dépend du durcissement}$$

On peut écrire la déformation du fluage de façon générale :

$$\varepsilon_f(t) = a \sigma(t) \frac{\sqrt{T}}{b + \sqrt{T}} \quad (3-94)$$

Avec :

$$T = t - t_1$$

$$a = \frac{K_s}{E28} \left[0.4 + \frac{100}{100 + t_1} \left(\frac{120 - eh}{100 + t_1} + \frac{2}{3} x \frac{100 - eh}{20 + rm} \right) \right] \quad (3-95)$$

$$b = 5\sqrt{rm}$$

Lors du calcul du fluage du béton ordinaire dans l'essai uniaxial (en compression ou en traction) on emploie directement les formules précédentes dans lesquelles la contrainte reste constante au cours du temps.

Dans le cas du fluage en flexion en dérivant la fonction de fluage, on obtient une expression de la forme :

$$\frac{\partial \varepsilon_f(t, y)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial \sigma(t, y)}{\partial t} f_1(t, b) + b \sigma(t, y) f_2(t, b) \right] \quad (3-96)$$

Avec $f_1(t, b)$ et $f_2(t, b)$ sont respectivement les fonction du temps et de l'épaisseur de l'éprouvette

Il n'y a pas de méthode analytique simple pour résoudre cette équation.

Dans le cas des bétons renforcés par les fibres métalliques SHEKARCHI et DEBICKI donnent un programme de calcul numérique qui permet la modélisation du fluage d'un mortier renforcé par les fibres en modifiant le coefficient K_s comme suit :

$$K_s = \frac{\alpha}{1 + (\text{Vf} \cdot \frac{1}{d} \cdot \beta \cdot \gamma)} \quad (3-97)$$

Avec

α : Coefficient pour tenir compte du dosage en ciment,

β et γ : sont des coefficients susceptibles de prendre en compte les paramètres liés à la forme et à la nature des fibres.

HOUARI [23] a adopté ce modèle pour les bétons de fibres métalliques en travaillant avec :

$$\alpha=2, \beta = +1.621 \text{ et } \gamma = -1.026$$

3-4-3-2. Modèle de MANGAT et AZARI

D'après [23], L'expression donnant le fluage du béton renforcé par les fibres métalliques ε_{fc} est obtenue à partir de la connaissance du fluage de la matrice sans fibres, cette expression a une forme semblable à cette donnée pour modéliser le retrait

$$\varepsilon_{fc} = \varepsilon_{0c} - \frac{0.3362 \tau d l^2}{s^2 E_c (0.41l + s)} \quad (3-49)$$

Avec :

s : est l'espacement entre fibres

l : est la longueur de la fibre

E_c : est la rigidité du témoin sans fibres

L'expression du fluage exige la connaissance de τ qui dépend de τ/E_C et de la pression radiale P exercée sur l'aire de la surface de la matrice.

La résistance inter-faciale moyenne τ a donné par : $\tau = \mu P$

$$\frac{P}{E_E} = \frac{(\varepsilon_{0s} + \varepsilon_{0l})\left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2}\right)}{\left\{ \left[\frac{\left(\frac{s}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}{\left(\frac{s}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} + \nu \right] + \frac{(1 - \nu_s)}{E_s/E_E} \right\} \frac{d}{2}} \quad (3 - 98)$$

$$\tau = \frac{\mu E_E (\varepsilon_{0s} + \varepsilon_{0l})\left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2}\right)}{\left\{ \left[\frac{\left(\frac{s}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}{\left(\frac{s}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} + \nu \right] + \frac{(1 - \nu_s)}{E_s/E_E} \right\} \frac{d}{2}} \quad (3 - 99)$$

Avec :

d : le diamètre de la fibre

l : la longueur de la fibre

Vf : le volume de fibre incorporé en pourcentage

ν : est le coefficient de poisson du béton

ν_s : est le coefficient de position de l'acier égal à 0.3

E_s : est le module d'élasticité de l'acier

E_E : est le module d'élasticité du béton

ε_{0s} : est la déformation de retrait de la matrice non renforcée

ε_{0l} : est la déformation latérale de la matrice non renforcée

Le fluage du béton de fibres métalliques est donné à l'aide de la formule suivante :

$$\varepsilon_{fc} = \varepsilon_{0c} - \frac{0.6724 l \alpha^2 \mu (\varepsilon_{0s} + \varepsilon_{0l}) \left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2}\right)}{\left\{ \left[\frac{\left(\frac{s}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}{\left(\frac{s}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} + \nu \right] + \frac{(1 - \nu_s)}{E_s/E_E} \right\} (0.411 + s)} \quad (3 - 100)$$

Avec : $\alpha = \frac{E_E}{E_C}$

3-5.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 fluage 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 nécessitent le calcul des coefficients pour chaque position j , il est remarquable que 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, 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 le fluage :

Plusieurs remarques s'imposent, il apparaît tout d'abord que la plupart des modèles regroupent des formules empiriques tels que : le modèle d'AROUTOUNIAN, de DELARUE, d'AROUTOUNIAN, de FRIEDRICH, de SHANK... , d'autres modèles(comme le modèle de ROSSE et LORMAN) se basent sur la valeur limite du fluage final.

Comme le retrait, une complexité des deux modèles EC2 et B3 est remarquable.

En ce qui concerne la modélisation des bétons de fibre, nous avons cité les deux modèles MANGAT et AZARIE et le modèle de SHEKARCHI-DEBIKI ce dernier est une extension du calcul BPEL par la modification du coefficient K_s , il nécessite un calcul numérique assez poussé pour donner des résultats acceptables.

L'insuffisance des modèles pour la prédiction du comportement du retrait et du fluage 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 :

- Pour le retrait : le modèle YOUNG et CHERN et le modèle HOUARI.
- Pour le fluage : le modèle LOUKILI et le modèle MANGAT et AZARIE

En effet, ces modèles répondent bien aux données expérimentales disponibles pour notre béton de fibre végétale, quoi que Loukili nous donne des formules empiriques, il ne prend pas en considération l'effet de plusieurs paramètres influençant plus ou moins sur le fluage, tels que : l'effet du chargement, les conditions de conservations et les éprouvettes (types, dimensions...)

Chapitre IV

ETUDE ET MODELISATION DU RETRAIT ET DU FLUAGE DES BETONS ET MORTIERS DE FIBRES DE PALMIER DATTIER

Etude et modélisation du retrait et du fluage des bétons et mortiers de fibres de palmier dattier

4-1.Introduction

Dans la littérature on trouve de nombreux modèles pour décrire le retrait et le fluage du béton ordinaire, ainsi qu'une multitude d'extension de l'application de ces modèles pour le béton de fibres métalliques.

De même, nombreux chercheurs, qui ont travaillé sur l'axe de recherche relatif à l'amélioration du retrait et du fluage des bétons renforcés par les fibres de palmier dattier, recommandent la nécessité de la modélisation des comportements rhéologiques (retrait et fluage) des bétons et mortiers de fibres de palmier afin de bien comprendre ce phénomène.

Nous rappelons que notre étude entre dans un cadre global qui s'intéresse à l'étude du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés par les fibres de palmier dattier, une première partie expérimentale a été effectuée par deux chercheurs : MERKHOUI [1] et KRIKER[4], l'objectif de cette présente étude qui constitue la deuxième partie de la recherche s'intéresse à la modélisation du retrait et fluage des bétons et mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier.

De ce fait, nous allons résumer au début, les études de MERKHOUI [1] et KRIKER[4] sur le retrait et fluage de bétons et mortiers renforcés par les fibres de palmier dattier ensuite nous donnerons des propositions des modèles relatifs au retrait et fluage.

4-2. Exposition des travaux de MERKHOUI sur les déformations rhéologiques du béton renforcé par les fibres du palmier dattier

Dans le cadre d'un mémoire de Magistère MERKHOUI [1] a entrepris un travail de comportement et l'étude des phénomènes rhéologiques (retrait et fluage) des bétons renforcés par des fibres du palmier dattier.

Il est important de donner quelques détails expérimentaux avant d'exposer les résultats d'essais. La composition du béton utilisé est détaillée sur le tableau (4-1) :

Tableau 4-1 : Composition de béton de fibres de palmier dattier utilisé par [1]

Les composants	Dosage	Provenance
Ciment CPJ 45	400 kg/m ³	Usine Ain Toutta- Algérie
Sable	774.60 kg/m ³	Hassi Sayeh-Ouargla- Algérie
Gravier	1105.88 kg/m ³	Haoud Elhamra-Ouargla- Algérie
Eau	200 l/ m ³	Eau potable -Ouargla- Algérie
Fibres	0.2 à 0.5%(dosage massique)	Palmier dattier – Ouargla
Super-plastifiant : MEDAPLAST-SP	0.4%	---

Deux milieux de conservations pour les 28 premiers jours sont utilisés :

-Air libre : T°=30 ± 5 °C, HR= 32.2 %

-Couverture par toile de Jute et arrosage deux fois par jour.

La dénomination utilisée 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.

4-2-1. Essai de retrait

Les essais de retrait sont effectués sur des éprouvettes 7x7x28 cm suivant la norme NF P 18-427, les résultats de la variation de retrait suivant les principaux paramètres sont illustrés sur le tableau (4-2)

Tableau 4-2 : Résultats expérimentaux du retrait du béton de fibre de palmier dattier [1]

Le graphe	Commentaires
-----------	--------------

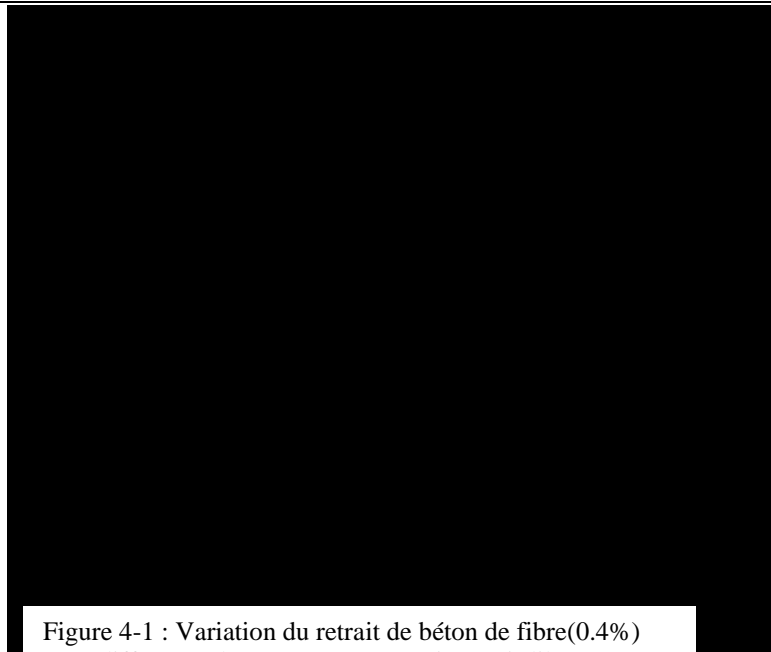


Figure 4-1 : Variation du retrait de béton de fibre(0.4%) pour différentes longueurs(conservation à air libre)

MERKHOUFI [1] trouve que :

- 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.

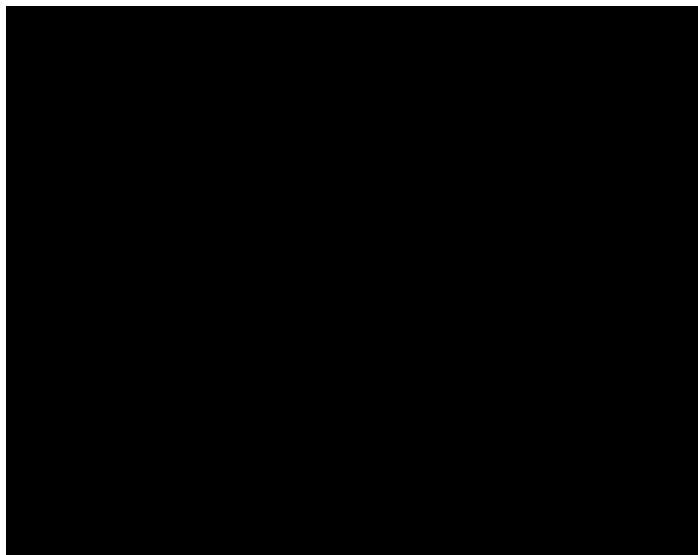
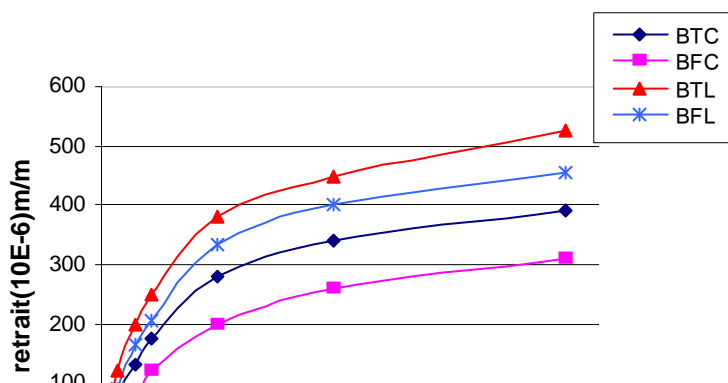


Figure 4-2 : Variation du retrait de béton de fibre(l=6cm) pour différents % de fibres(conservation à air libre)

-Avec le pourcentage 0.5 et la longueur 6 cm, le retrait du béton de fibre est supérieur au retrait du béton témoin.

Par contre, les autres BF présentent un retrait inférieur au béton témoin.



-Diminution de retrait de béton

<p>Figure 4-3 :Variation du retrait de béton de fibre pour différents modes de conservation (l=6cm, 0.4%)</p>	<p>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 donnent 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>
---	---



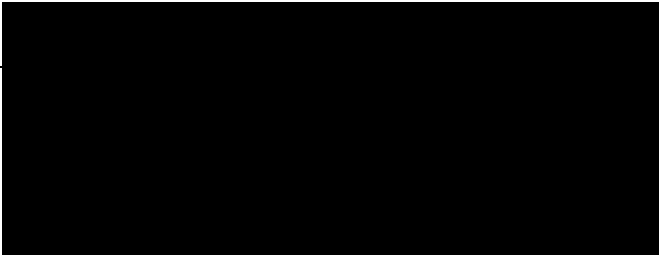
4-2-2 Essai de fluage :

Les essais de fluage sont effectués sur des éprouvettes de dimensions 5 x 10 x 120 cm à l'aide d'un instrument préparé par MERKHOUMI [1] (Photo 4-1 : Annexe)

Les charges appliquées sont de 10, 30, et 50% de la charge de rupture Pr.

L'ensemble des résultats est illustré dans le tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Résultats expérimentaux de fluage du béton de fibre de palmier dattier [1]

Le graphe	Commentaires
 <p data-bbox="194 981 895 1039">Figure 4-4 : Variation de fluage de béton de fibre pour différents modes de conservation (l=6cm, 0.4%)</p>	<p data-bbox="959 331 1548 640">MERKHOUFI[1] a mis en évidence la variation du fluage pour les différents milieux de conservation, il montre que le fluage d'un béton conservé dans l'air est inférieur à celui couvert par la toile de jute La figure(4-4)</p> <p data-bbox="959 663 1548 1133">Il a justifié cette diminution de fluage d'un béton conservé dans l'air par rapport à celui couvert par la toile de jute par le fait que l'arrosage de ce dernier fait augmenter les réactions d'hydratation du ciment plus spécialement la libération de la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) donc une réduction de la résistance des fibres à long terme (après 28 jours)et une augmentation du fluage</p>
 <p data-bbox="194 1771 887 1830">Figure 4-5 : influence de la longueur des fibres sur le fluage BF(0.4%)</p>	<p data-bbox="959 1223 1548 1693">Parmi les études de MERKHOUFI[1] sur le béton renforcé par les fibres de palmier dattier avec un pourcentage massique de 0.4%, il fait varier la longueur des fibres de 02 à 08 cm avec un pas de 02 cm, les résultats d'essais sont résumés dans la figure (4-5), MERKHOUFI[1] affirme que la longueur n'a pas une grande influence sur le fluage.</p>
	

<p>Figure 4-6 : influence de taux de chargement sur le fluage de BF (éprouvettes conservées)</p>	<p>La figure 4-6 montre l'augmentation du fluage en fonction du chargement pour les deux milieux de conservation (toile de jute et air ambiant) dans le cas d'un béton renforcé par les fibres du palmier dattier [1]</p>
--	---

4-3.Exposition des travaux de KRIKER[4] sur le retrait de mortiers renforcés par les fibres du palmier dattier

Dans sa thèse de Doctorat d'état, KRIKER [4] a entrepris un travail sur le comportement du mortier renforcé par les fibres du palmier dattier vis à vis du retrait.

Les détails expérimentaux sont donnés ci dessous :

Pour la composition des mortiers de fibre, la masse de ciment est maintenue constante, et le dosage en (volume) fibres varie de 1% à 3% pour les fibres de longueur 60 mm et de 1% à 6% pour les fibres de 15 mm. La quantité de sable varie de sorte que la quantité totale en poids de fibres plus sable demeure constante.

Le mortier de fibre (MF) est composé comme l'indique le tableau 4-4, d'un ciment de type CPA-CEM I, un sable normalisé, et des fibres de surface du palmier mâle,

Tableau 4-4 : 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 (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	

Des éprouvettes 4x4x16 mm, sont utilisées pour mesurer le retrait sur mortier normalisé avec ou sans fibres de palmier, selon la norme NF 15-433, et à l'aide d'un rétractomètre numérique E0078 M (CONROLAB) (photo 4-2 : Annexe) Les mesures de retrait de référence et des poids initiaux des différentes éprouvettes étaient faites à 1 jour au moment du démoulage. En suite les éprouvettes sont conservées dans différentes cures (CU, CE7-CU et CE14-CU) jusqu'à la date de mesure : 7, 14, 28, 90, et 180 jours.

- CE7-CU: conservation les 07 premiers jours dans une chambre humide et saturée sous des conditions climatique de $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $HR = 100\%$ ensuite dans l'étuve sous les conditions $T = 32 \pm 2^\circ\text{C}$ et $HR = 28\% \pm 2$.
- CE14-CU: conservation les 14 premiers jours dans une chambre humide et saturée sous des conditions climatique de $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $HR = 100\%$ ensuite dans l'étuve sous les conditions $T = 32 \pm 2^\circ\text{C}$ et $HR = 28\% \pm 2$.
- CU: conservation dans l'étuve sous les conditions $T = 32 \pm 2^\circ\text{C}$ et $HR = 28\% \pm 2$.

L'ensemble des résultats sur la variation du retrait en fonction de milieu de conservation est donné par le tableau (4-5) sur les légendes de notation à titre d'exemple : 1%- 15: c'est-à-dire 1% en volume de fibre et la longueur de fibre égale à 15 mm

Tableau 4-5 : Résultats expérimentaux du retrait du mortier de fibre de palmier dattier [4]

Le graphe	Commentaire
<p>Figure 4-7 : Retrait des mortiers de fibres de palmier conservés dans l'étuve (CU)</p>	
<p>Figure 4-8 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE7-CU</p>	<p>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</p> <p>Les retraits les plus inférieurs sont obtenus pour 1% en fibre.</p>
<p>Figure 4-9 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE14-CU</p>	

4-4. Modélisation du retrait du béton de fibre de palmier dattier

Dans ce qui suit, la dénomination utilisée est la suivante :

BF X - Y: béton de fibre ayant un pourcentage massique de fibres égal à X, et Y est la longueur en millimètre de ces fibres.

Exemple : BF 0.4 – 60 : béton de fibre ayant un pourcentage massique de fibres égal à 0.4% et de longueur de 60mm.

MF X - Y: mortier de fibre ayant un pourcentage volumique de fibres égal à X, et Y est la longueur en millimètre de ces fibres.

Exemple : MF 1% – 15 : mortier de fibre ayant un pourcentage volumique de fibres égal à 1% et de longueur de 15mm.

Avant d'entamer l'adaptation des quelques modèles pour le retrait et fluage de BFPD nous donnons quelques notions et hypothèses à prendre en compte dans l'élaboration des modèles de retrait, en général :

- L'incorporation des fibres diminue le retrait final de béton
- Le retrait est fonction de départ d'eau de la matrice, tant qu'il y'a départ d'eau, on a un retrait.
- Les fibres de palmier ont un pouvoir hydrofuge (absorption d'eau) très élevé ce qui influe certainement sur le retrait.

4-4-1. Application du modèle de Young et Chern pour le retrait de béton de fibre de palmier dattier

En premier lieu, nous avons évoqué au chapitre 3, que le modèle Young et Chern est une extension du modèle BP (Bazant et Pannula), il est basé sur plusieurs paramètres tels que : la composition du mélange, la résistance, l'âge en début de séchage, les conditions ambiantes, les dimensions et la forme des pièces, le volume de fibres, l'allongement de la fibre...

A)- Etapes de calcul

Les étapes de calcul du modèle de Young et Chern sont données au chapitre 03, dans ce qui suit nous donnerons seulement les résultats de calcul.

Tableau 4-6 : Résultats de calcul par Young et Chern du retrait du béton de fibre de palmier

Facteur	Valeur ou expression
K_s	2
D	56 cm
K'	3.75
$C(t)$	$48.75 \cdot \left[0.05 + \sqrt{\frac{6.3}{t}} \right]$
τ_s	$600 \left(\frac{K_s}{150} \cdot 2 \right)^2 \frac{10}{C(t)} = \frac{4.27}{C(t)}$
$Q(t)$	$\sqrt{\frac{t}{\tau_s + t}} = \sqrt{\frac{t}{\tau_s + 1}}$
K_h	0.271
ϵ_{su}	$1.0805 \cdot \epsilon_u \sqrt{\frac{4 + 0.85(t + \tau_s)}{t + \tau_s}}$

B)- Résultats

Les figures 4-10 (a -e) et les tableaux 4 -7, 4 - 8 et 4 - 9 donnent le retrait expérimental et le retrait obtenu en appliquant le modèle de Young et Chern, nous remarquons qu'il y'a une très grande dispersion entre les résultats expérimentaux du retrait et les valeurs du modèle de Young et Chern, d'où la nécessité de corriger ce modèle.

Tableau 4-7 : les valeurs des facteurs de temps $C(t)$, τ_s , et $Q(t)$ Young et Chern du béton de fibre de palmier

Age(jours)	$C(t)$	τ_s	$Q(t)$
1	124.8	0.0342	0.983
2	88.9	0.048	1.381
3	73.08	0.058	1.727
7	48.68	0.087	2.537
14	35.14	0.121	3.53
28	25.56	0.167	4.89

Touts les valeurs de ϵ_u , et $\epsilon_{\text{modèle}}$ sont données par $10E^{-6}$ m/m

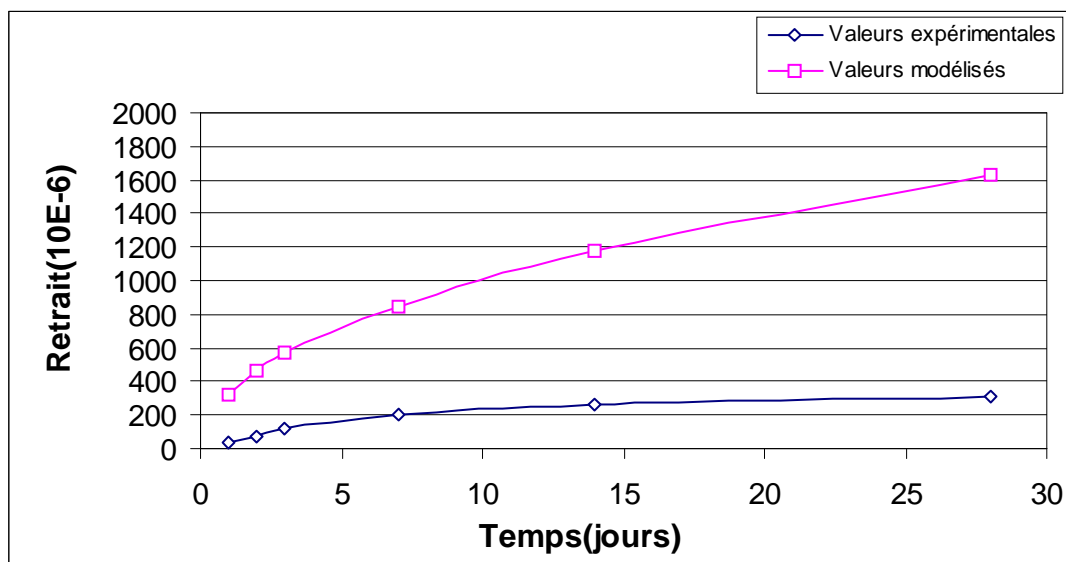
Tableau 4-8 Retrait ultime de béton de fibre

BF	0.2%-60	0.3%-60	0.4%-60	0.5%-60	0.4%-20	0.4%-40	0.4%-80
ϵ_u	1139	1138.22	1137.5	11336.7	1139.5	1138.5	1136.4

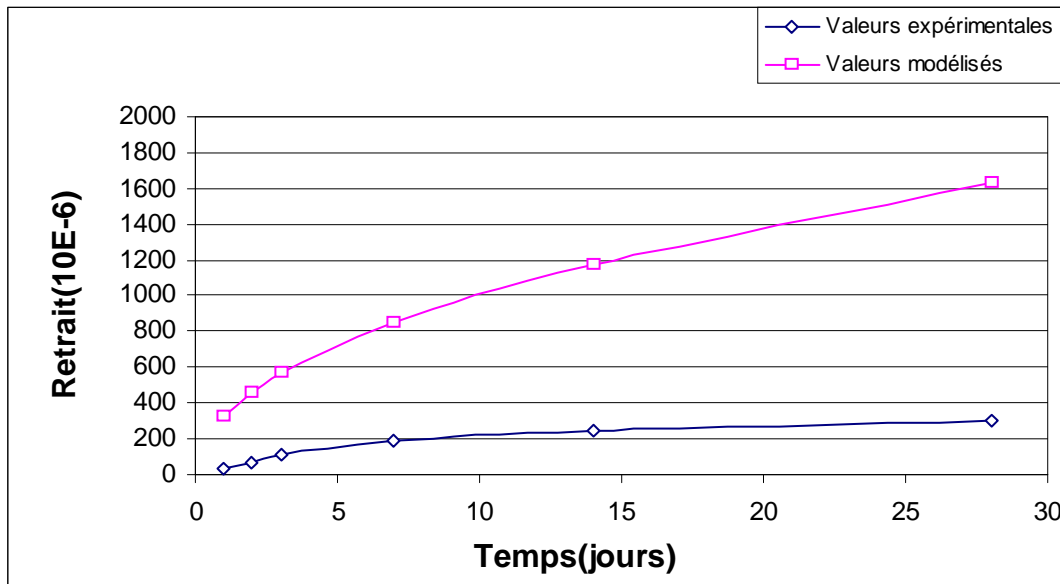
Tableau 4-9 Retrait de béton de fibre Young et Chern non modifié

BF	0.2%-60		0.3%-60		0.4%-60		0.5%-60	
	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$
1	40	327.36	39	327.13	40	327	37	326.7
2	75	460.27	74	460	75	459.7	69	459.3
3	122.2	576	130	575.5	120	575.2	110	574.7
7	211	3122.2	253	845	200	844.4	189	844
14	356	4344	307	1176	260	1175	245	1174
28	380	6018.07	310	1632	310	1631	302	1629.8

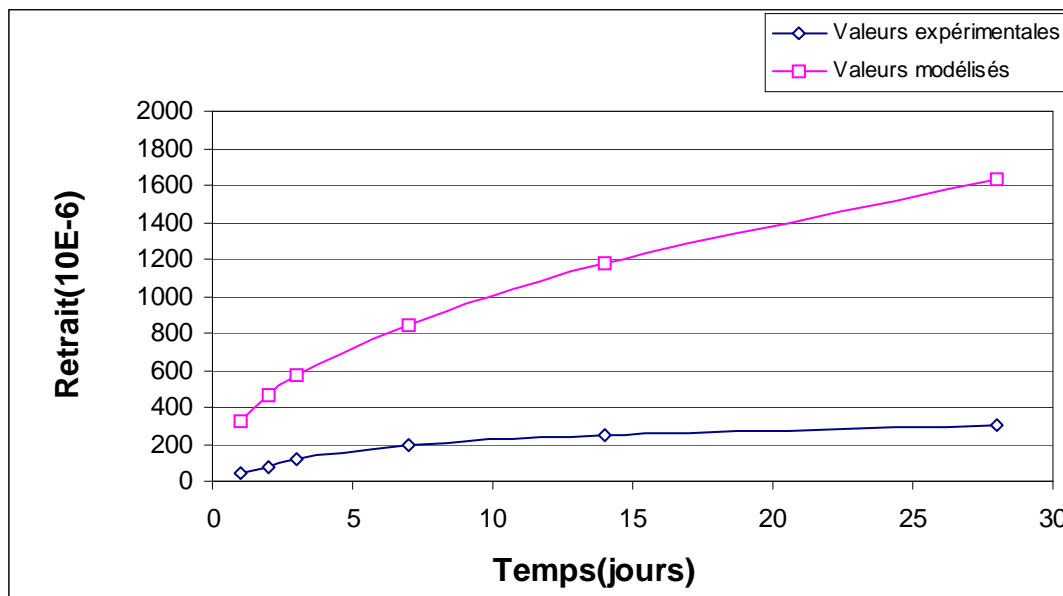
BF	0.4%-20		0.4%-40		0.4%-80	
	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$
1	40	327.5	40	327.2	40	326.6
2	75	460.5	75	460	75	495.2
3	120	576.2	120	575.7	120	574.6
7	190	846	195	845.1	211	843.5
14	245	1177	258	1176	266	1173.8
28	305	1634	301	1632	315	1605



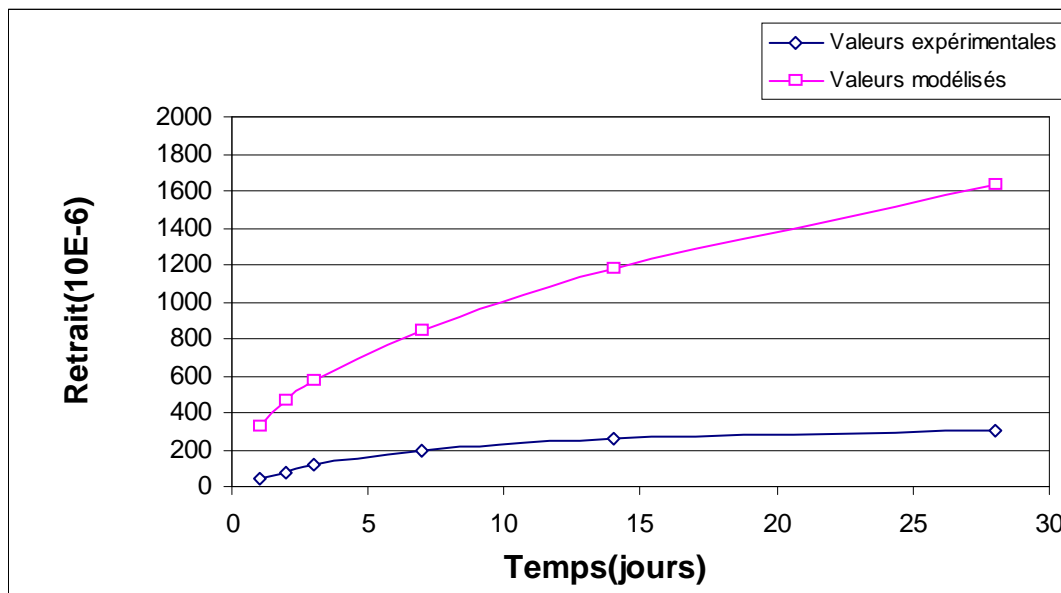
(a): BF 0.4 - 60



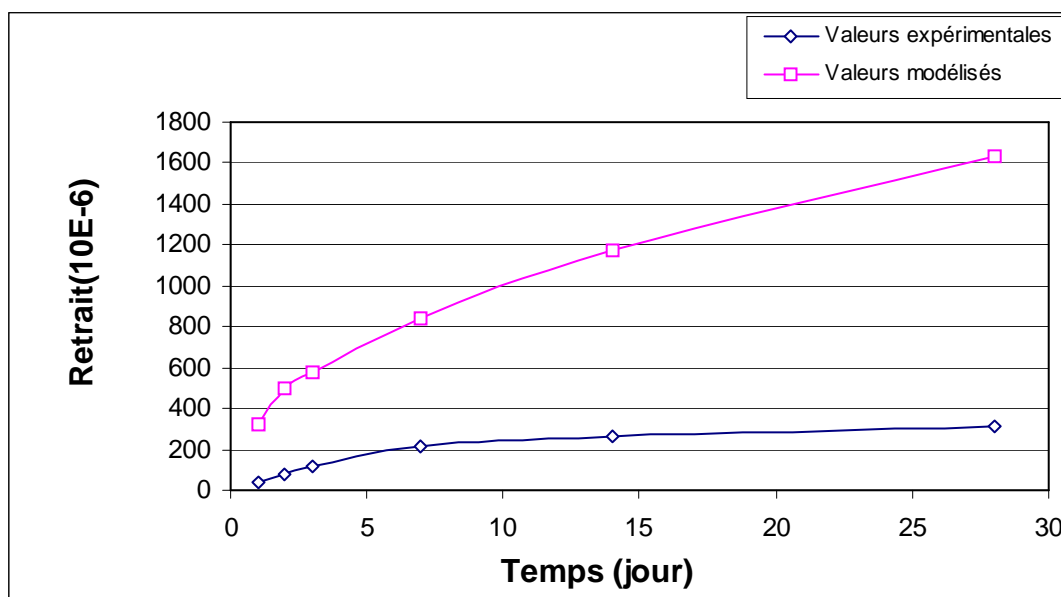
(b) : BF 0.5 - 60



(c) : BF 0.4 - 20



(d) : BF 0.4 - 40



(e) : BF 0.4 - 80

Figure 4-10 : Retrait des bétons de fibre de palmier dattier par modèle Young et Chern

C) Adaptation du modèle de Young et Chern au béton de fibre de palmier

Comme nous venons de voir, 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))

Rappelons que, pour la composition de Merkhoufi (Tableau 4-1), on trouve $Z=2.68$ et $y=0.1168$

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 tels 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

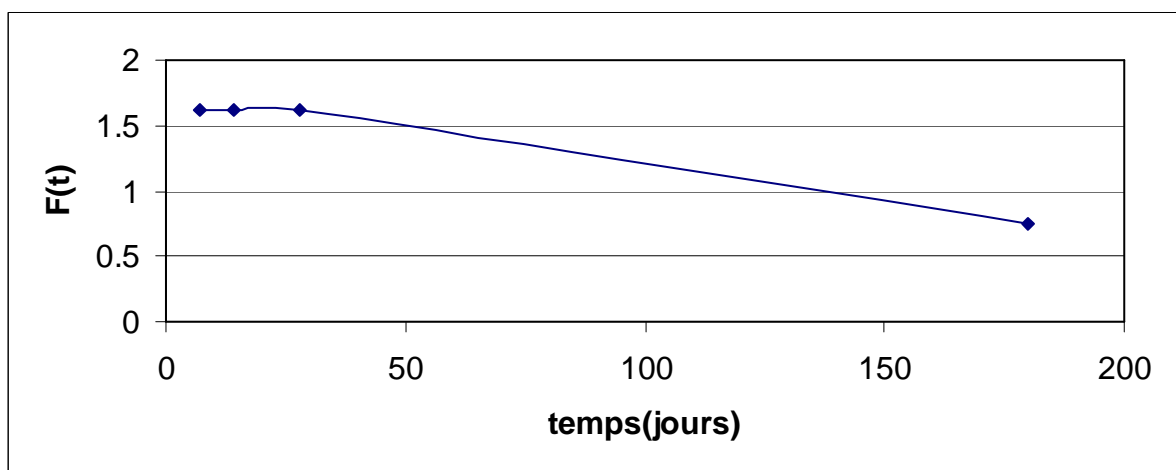
avons modifié l'expression de Young et Chern : $1.0805 \sqrt{\frac{t}{\varpi+1}} \cdot \sqrt{\frac{4+0.85(t+\varpi)}{t+\varpi}}$ par un

facteur Q et une fonction F(t) qui sont déterminés comme suit :

3- La fonction F(t):

$$\left\{ \begin{array}{l} F(t) = 1.625 - 0.00362.t \quad \text{pour } t \leq 28 \text{ jours} \\ (4-1) \end{array} \right.$$

$$F(t) = 0.751 - 0.0036.t \quad \text{pour } t > 28 \text{ jours} \quad (4-2)$$



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:

$$Q = \frac{2.69 \cdot F(t)}{s} \cdot t$$

(4-3)

Avec :

s : est la section transversale de la pièce donnée en cm^2 .

De ce fait, nous proposons la formule suivante pour évaluer le retrait du béton de fibre de palmier dattier :

$$\varepsilon = Kh \cdot Q \cdot \varepsilon_u$$

(4-4)

Avec :

ε : est le retrait du béton de fibre de palmier dattier.

ε_u : le retrait ultime

Kh : facteur d'humidité.

D)- Application du modèle de Young et Chern modifié :

Les figures (4-11) (a -g) et le tableau 4-10, donnent les résultats de l'application du modèle Young et Chern modifié, ce modèle sera désormais appelé : modèle AKCHICHE - KRIKER - CHACHA.

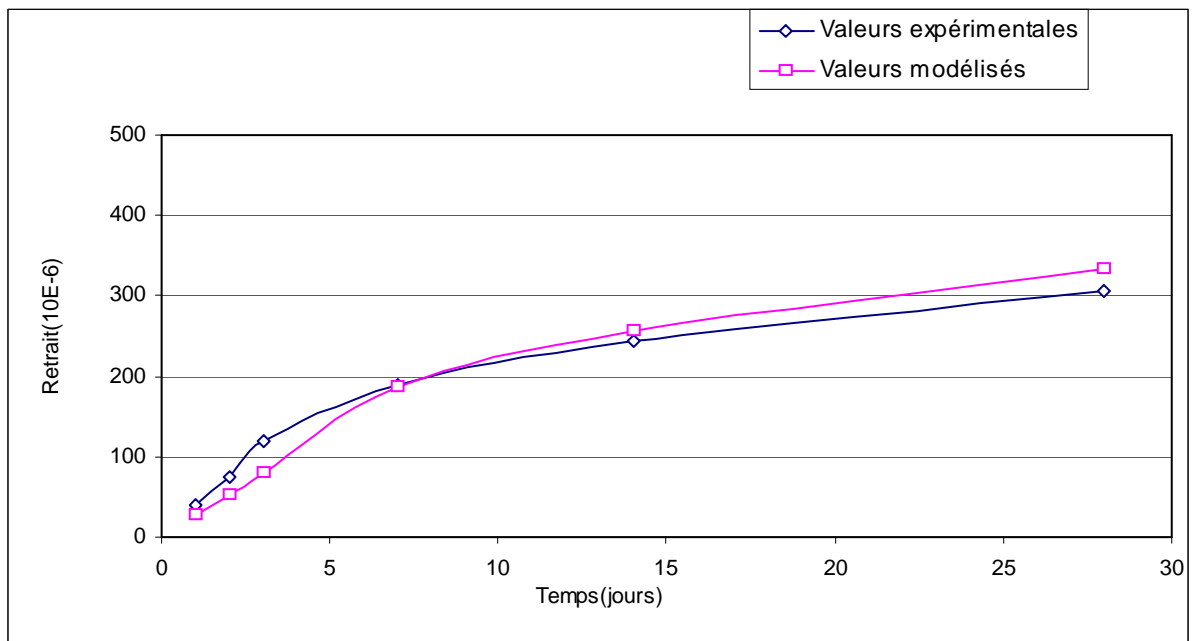
Nous remarquons que le taux de variation TV pour les bétons de fibres de palmier dattier n'excède pas 35% pour la plu part des points d'essais, ce taux est donné par la formule

$$\text{TV}(\%) = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{modèle}}}{\varepsilon}$$

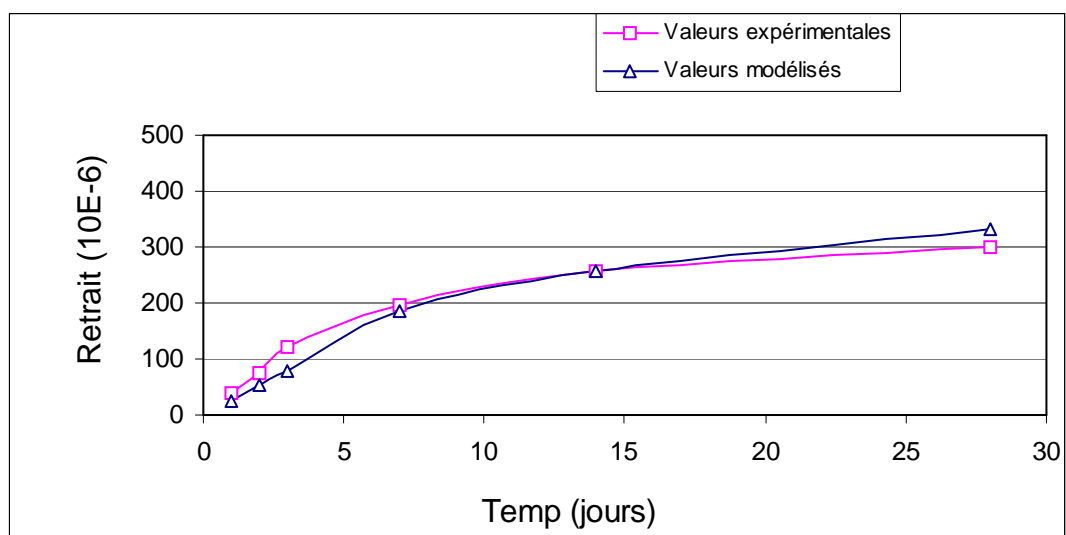
Tableau 4-10 Retrait de béton de fibre Young et Chern modifié

BF	0.2%-60			0.3%-60			0.4%-60		
Age (j)	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %
1	40	26.58	33.5	39	26.5	32	40	26.5	33
2	75	53.18	29	74	53	28.3	75	53	29.3
3	122.2	79.77	34	130	79.6	38	120	79.6	33
7	211	186.12	11.7	253	186	26	200	185.8	7.1
14	356	256.7	27	307	256	16.6	260	256	1.5
28	380	333.7	12.1	310	333	-7.41	310	333.3	-7.5

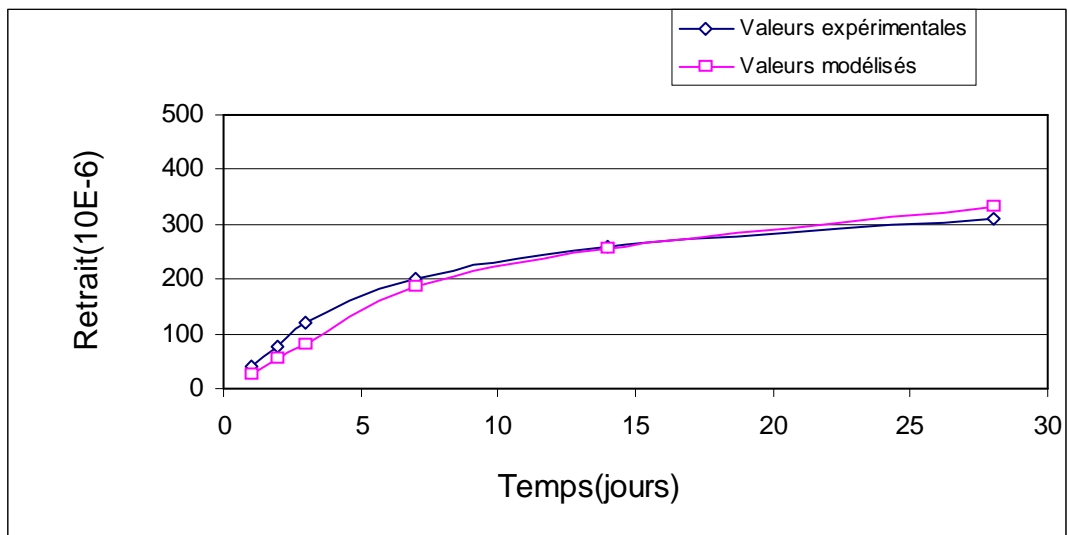
BF	0.5%-60			0.4%-20			0.4%-40			0.4%-80		
Age (j)	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %
1	37	26.53	28.2	40	26.6	33.5	40	26.6	33.5	40	26.53	33
2	69	53.07	23	75	53.2	29	75	53.15	29.1	75	53.06	29
3	110	79.6	27	120	79.8	33.5	120	79.7	33	120	79.6	33
7	189	185.7	1.7	190	186	2.1	195	186.04	4.5	211	186	11
14	245	256.2	-4.5	245	257	-4.8	258	257	0.3	266	256.15	3.7
28	302	333	-10	305	334	-9.5	301	333	-10.6	315	333	-5.7



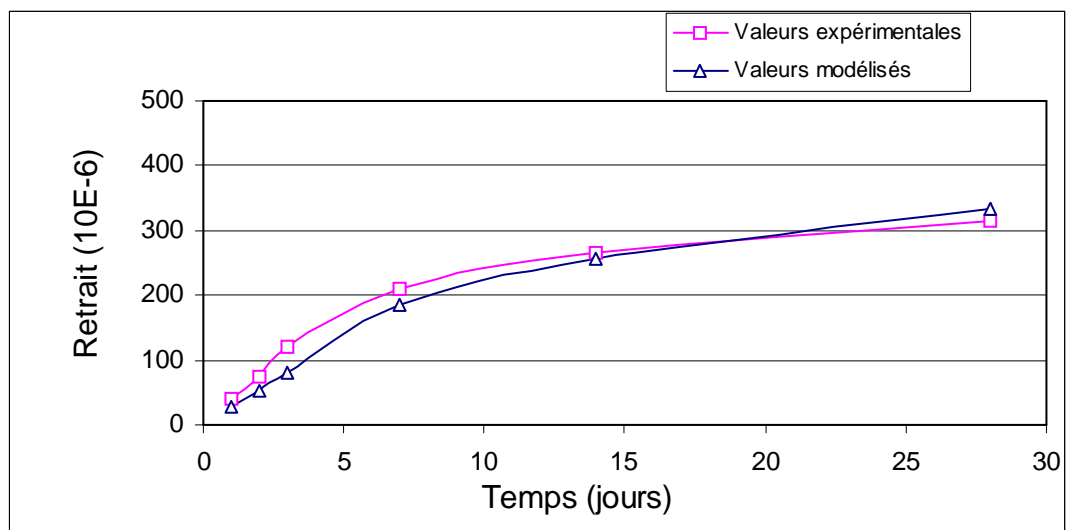
(a) : BF 0.4 - 20



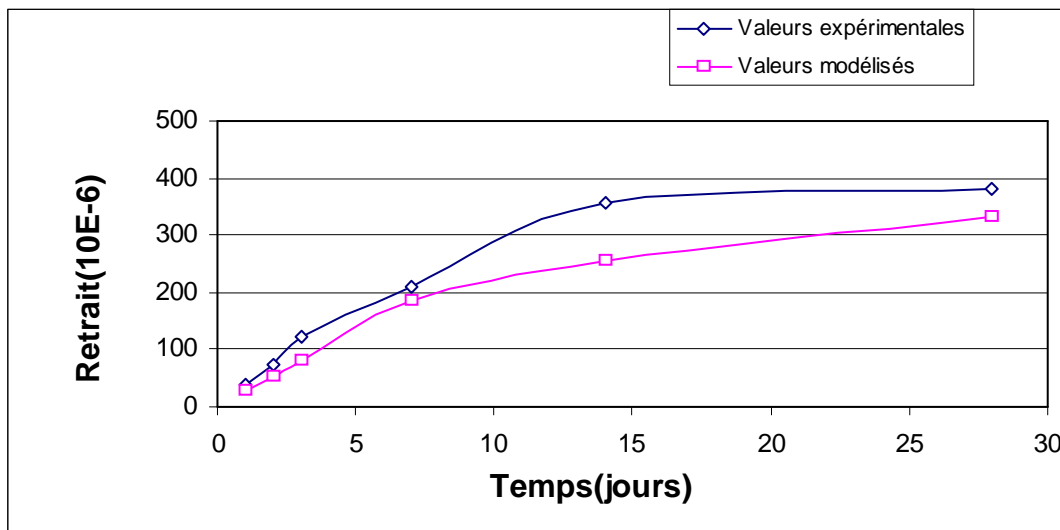
(b) : BF 0.4 - 40



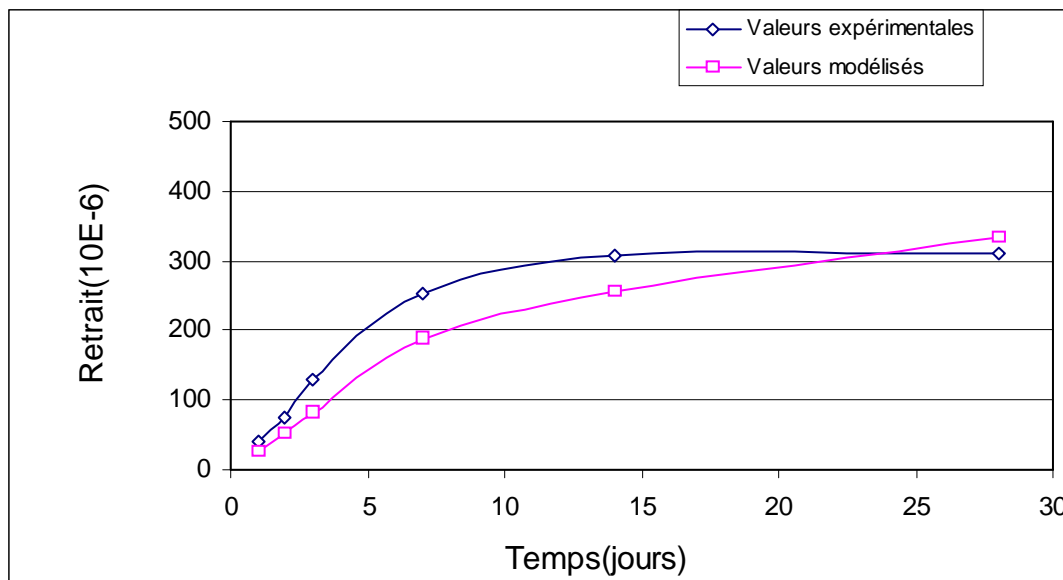
(c) : BF 0.4 - 60



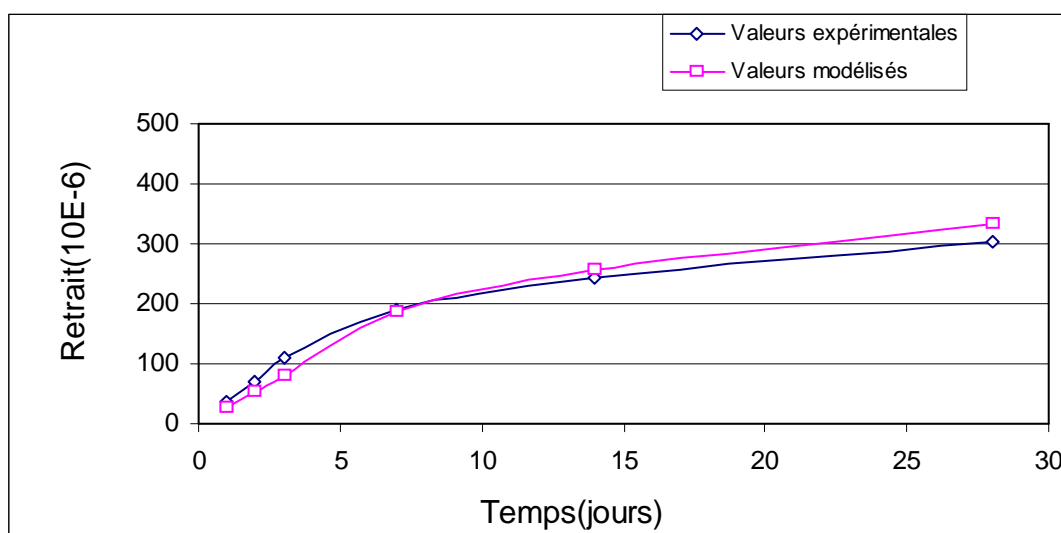
(d) : BF 0.4 - 80



(e) : BF 0.2 - 60



(f) : BF 0.3 - 60



(g) : BF 0.5 - 60

Figure 4-11 : Estimation du retrait du béton de fibre de palmier dattier

Les figures 4-11(a-g) montrent qu'il y'a une corrélation acceptable entre le modèle et les résultats expérimentaux quel que soit la longueur et le % des fibres incorporées.

De ce fait, on peut dire que ce modèle modifié peut interpréter d'une façon acceptable le retrait des bétons de fibre du palmier dattier.

4-4-2. Modélisation de retrait du mortier renforcé par les fibres de palmier dattier :

4-4-2-1. Adaptation du modèle de Young et Chern

Une nouvelle extension du modèle de Young et Chern est l'adaptation de ce modèle sur le retrait du mortier de fibres de palmier dattier, dans ce cas nous adoptons le modèle Young et Chern modifié.

Les corrélations : calcul-expérience sont traduites par les courbes de figure 4 -12 et les deux tableaux 4-11 et 4-12, une très bonne corrélation est remarquée pour les mortiers : MF3%-15, et MF3%-60

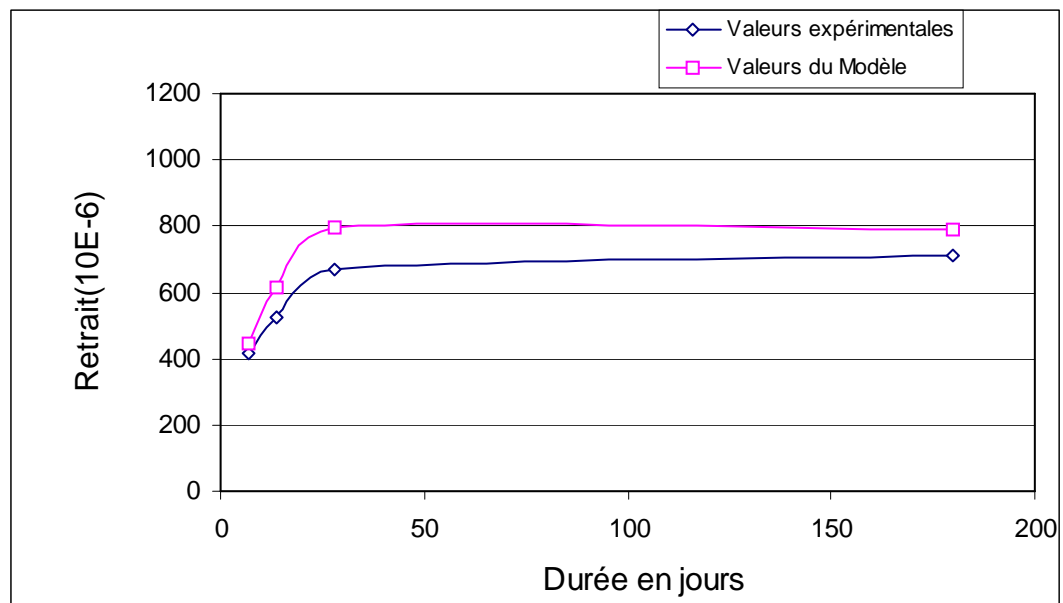
Tableau 4-11 Retrait ultime du mortier de fibre de palmier dattier Young et Chern

MF	1%-15	3%-15	6%-15	1%-60	3%-60
ϵ_u	1208	1204.15	1198.53	1202.86	1187.52

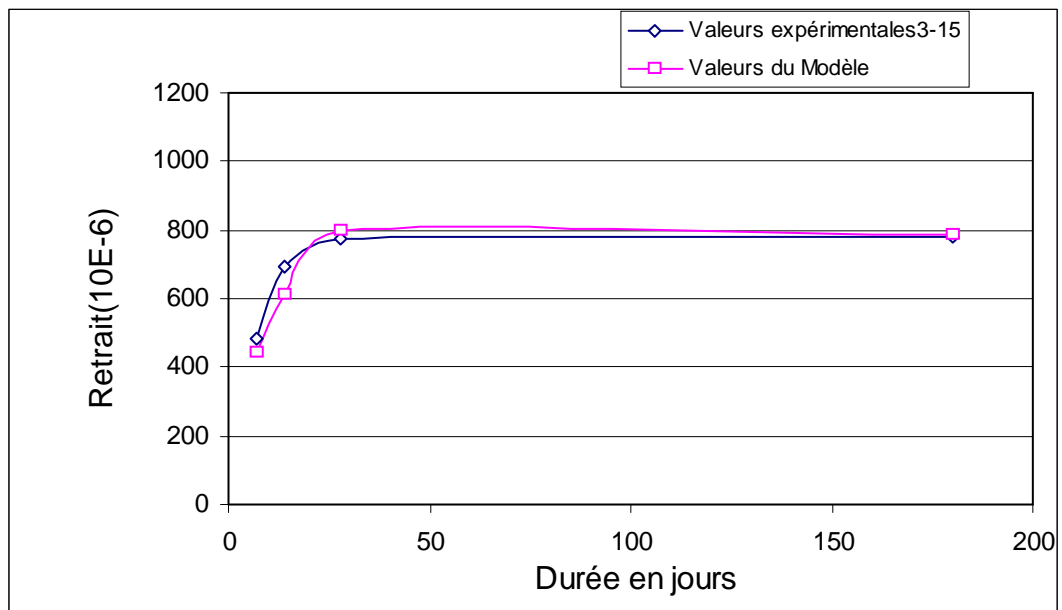
Tableau 4-12 Retrait de mortier de fibre Young et Chern dattier modifié

MF	1-15			3-15			6-15		
	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	TV %
7	417.4	527.6	-26.4	486	449.75	7.4	487	412	15.4
14	521.7	703.4	-34	695.6	599	13	713	499	30.0
28	669	831	-24	773.9	708	8.5	956.5	648.7	32
180	713.04	904.5	-26.8	782.6	770	1.6	1078.2	706	34

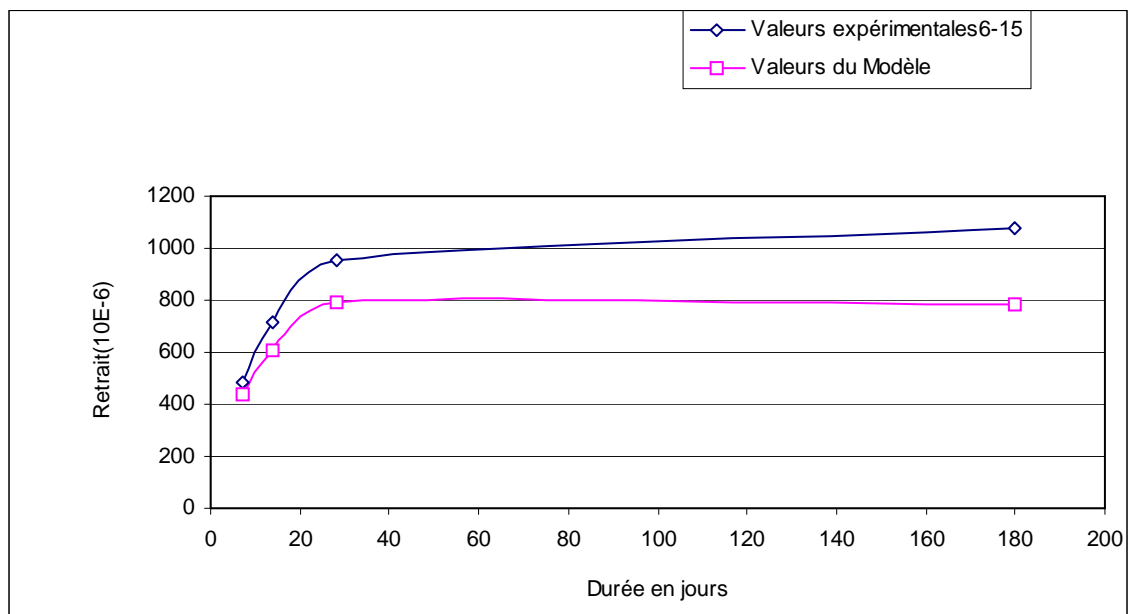
MF	1-60			3-60		
	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	TV %
7	434.7	431	0.85	486.9	400	17.8
14	574	574	0	695.6	534	23
28	695.6	679	2.3	782.6	630	19.4
180	730.43	738.7	-1.1	800	686	14.2



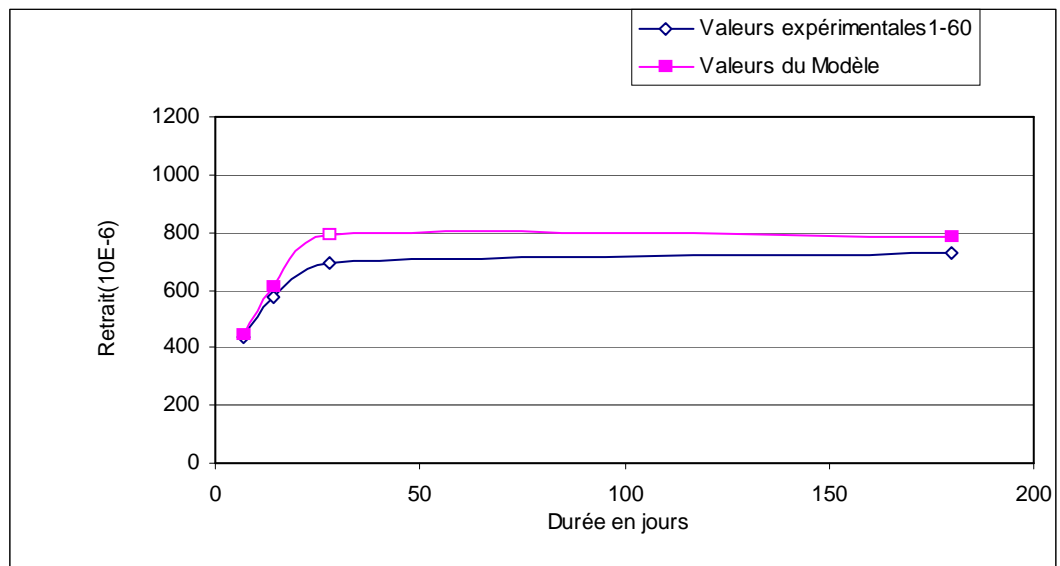
(a) : MF 1%-15



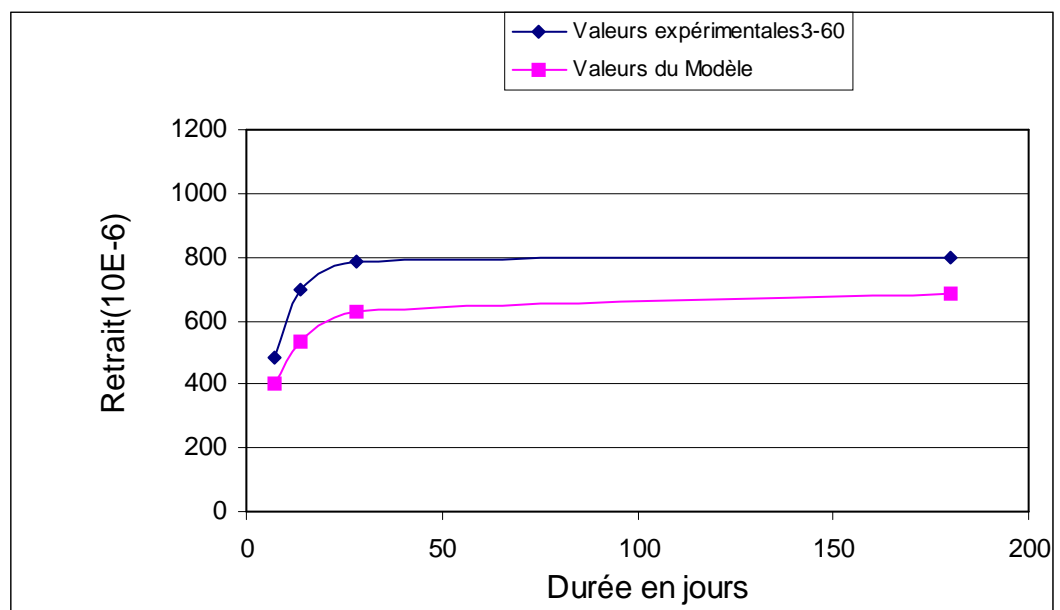
(b) : MF 3%-15



(c) : MF 6%-15



(d) : MF 1%-60



(d) : MF 3%-60

Figure 4-12 : Estimation de retrait de mortier de fibre de palmier dattier

4-4-2-2. Adaptation de l'expression de Hacène HOUARI :

Une formule empirique du retrait a été proposée par HOUARI, cette formule prend en compte le retrait du mortier témoin, le pourcentage du volume de fibres et l'élanement

des fibres, cette formule est donnée au chapitre 3 (formule(3-65)), elle est de la forme suivante :

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{0s} \cdot (1 - 0.041 \cdot V_f \cdot \frac{l}{d})$$

Ou ε_{fs} : Retrait libre du mortier renforcé de fibres métalliques:

ε_{0s} : le retrait correspondant du mortier témoin

V_f : le volume de fibre incorporé en pourcentage

l : la longueur de la fibre

d : le diamètre de la fibre

Après une série d’essais d’itération nous proposons une légère modification de cette formule. Cela pour permettre son application pour le retrait du mortier des fibres de palmier dattier. La modification consiste à changer le nombre 0.041 par 0.046, et prendre d égale au diamètre moyen des fibres, de sorte que le taux de variation entre le point expérimental et le point du modèle n’excède pas 30% pour la majorité des points. La formule modifiée sera désormais appelée modèle de HOUARI modifié par AKCHICHE - KRIKER – CHACHA comme suit :

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{0s} \cdot (1 - 0.046 \cdot V_f \cdot \frac{l}{d_m}) \tag{4-5}$$

Avec d_m est le diamètre moyen des fibres est pris égal à 0.45 mm[4]

Le tableau 4-13 donne les résultats de calcul en appliquant la formule (4-5)

Tableau 4-13 Retrait de mortier de fibre de palmier dattier Houari modifié

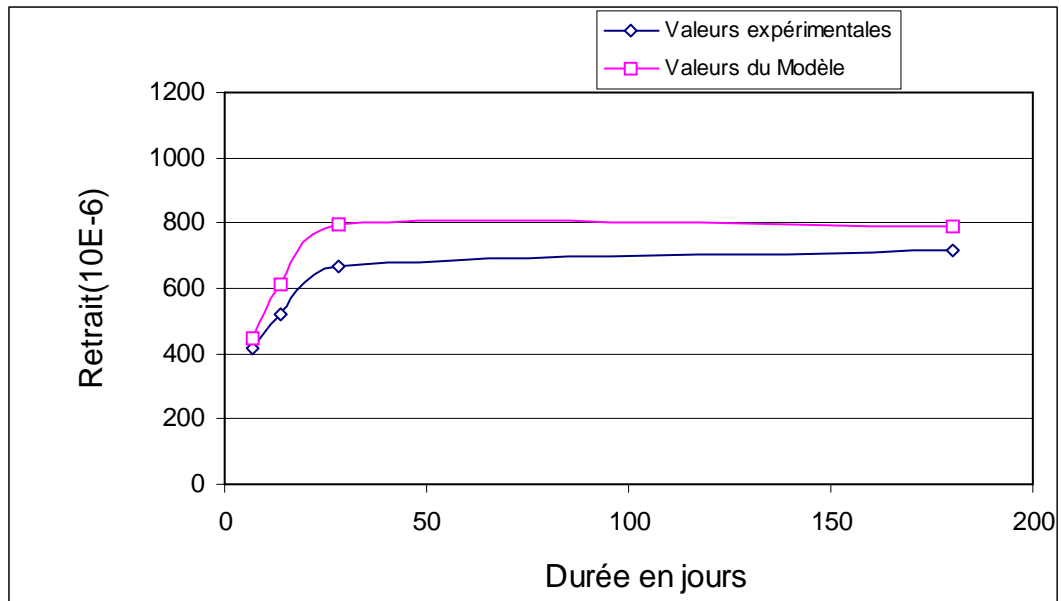
MF	0%	1-15			3-15			6-15		
	Age(j)	ε	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$
7	486	417.4	445	-6.6	486	444.05	8.6	487	442	9.24
14	608.7	521.7	614.4	-17.7	695.6	612.5	11	713	609.6	14.5
28	747.8	669	790	-19.3	773.9	787.5	-2.8	956.5	784	17.1
180	765.2	713.43	798.7	-10.7	782.6	796.2	-0.6	1078.2	792.5	27

MF	1-60			3-60		
	Age (J)	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$	TV %	ε	$\varepsilon_{\text{modèle}}$
7	434.7	443.3	-1.97	486.9	437.9	10
14	574	611.5	-6.53	695.6	604.02	13.1
28	695.6	786.2	-14.1	782.6	776.6	-0.33
180	730.43	794	-7.6	800	785.2	2.9

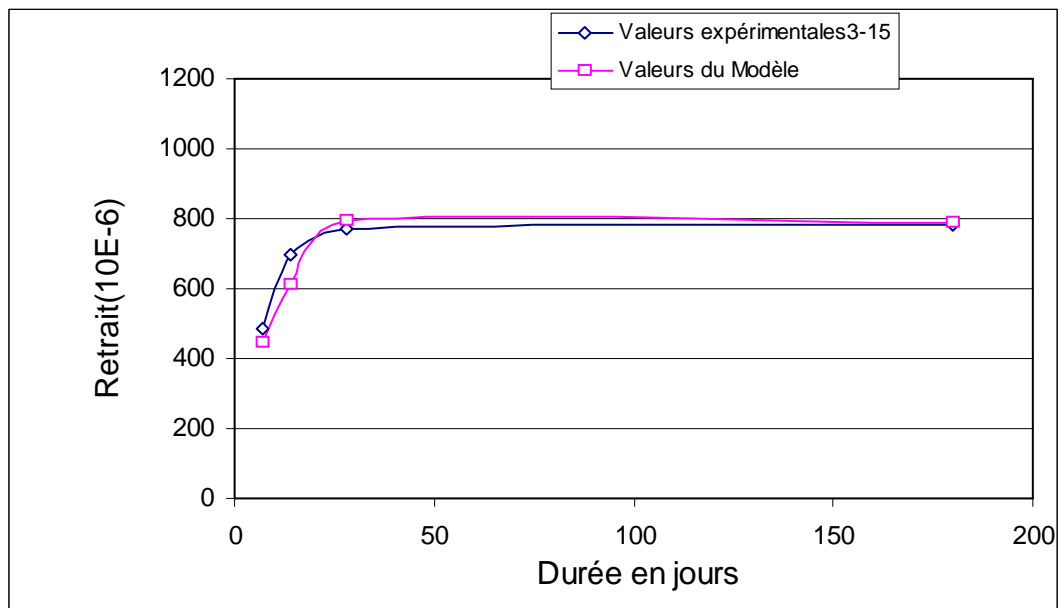
En comparant les courbes théoriques et expérimentales du retrait (figures 4-13), on remarque que :

- Les courbes théoriques ont les mêmes allures que les courbes expérimentales,

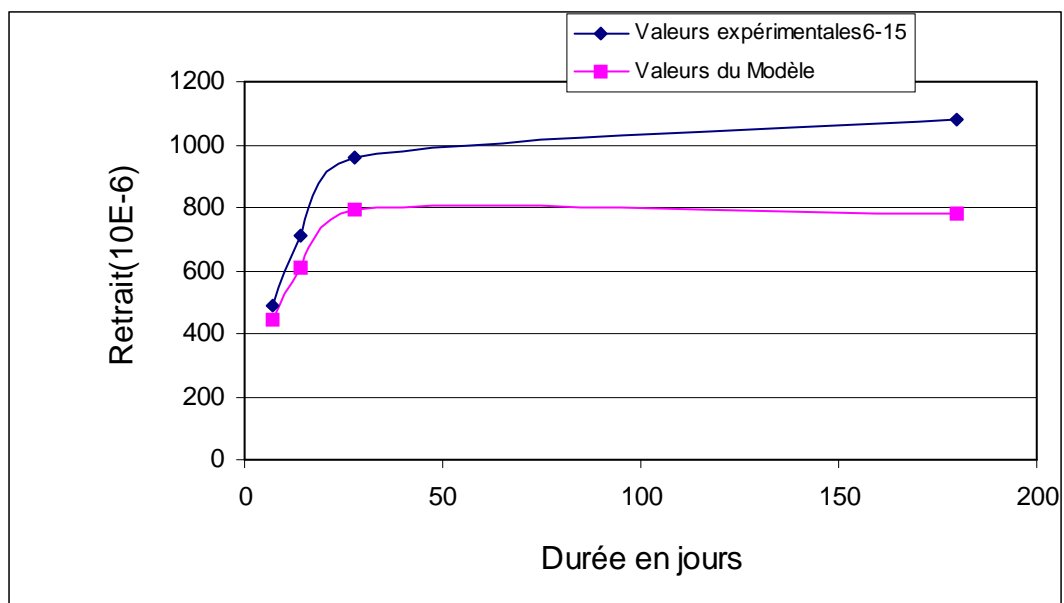
- Une sous estimation de retrait de béton fibré pour un pourcentage volumique supérieur ou égal à 3%,
- L'utilisation des fibres (1%-15 mm) donne des résultats légèrement plus élevés que ceux mesurés expérimentalement
- Une bonne corrélation est obtenue pour les mortiers renforcés par les fibres ayant une longueur de 60mm et un pourcentage volumique 3%.



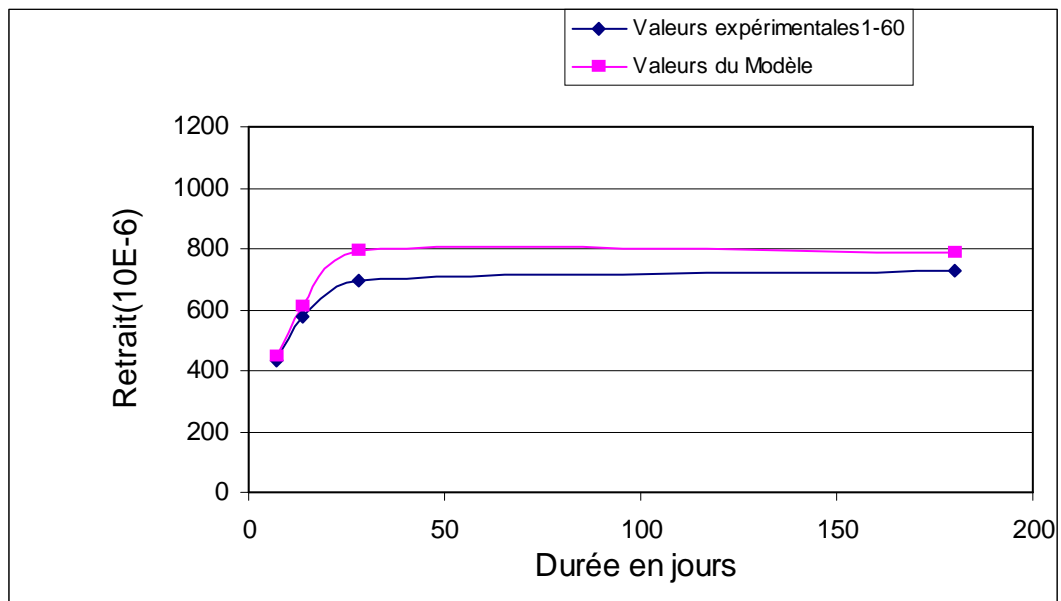
(a) : MF 1%-15



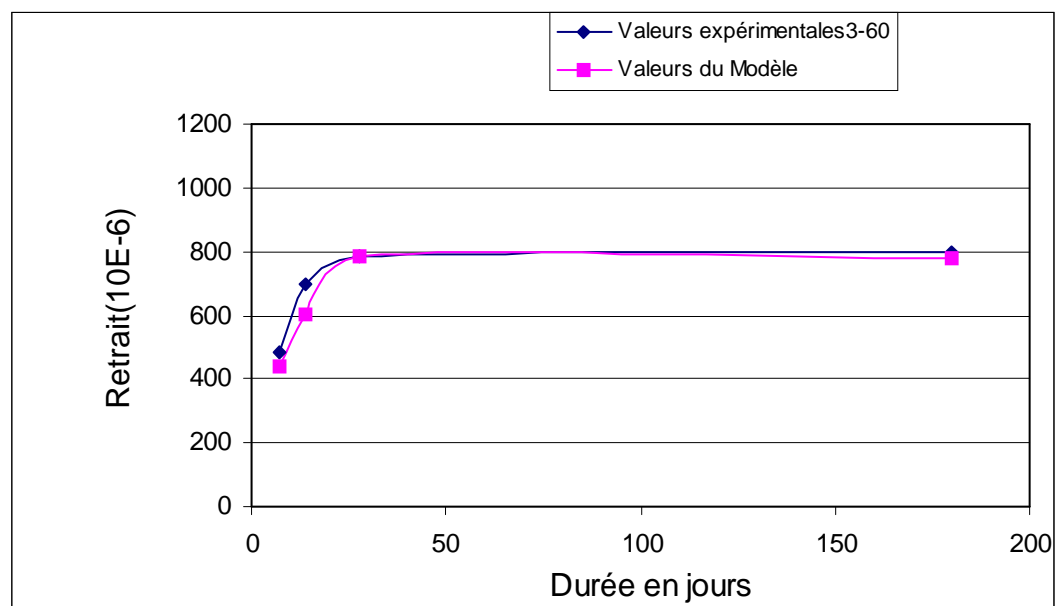
(b) : MF 3%-15



(c) : MF 6%-15



(d) : MF 1%-60



(e) : MF 3%-60

Figure 4-13 : Estimation de retrait de mortier de fibre de palmier dattier

(Modèle Houari modifié)

4-5. Modélisation du fluage du béton de palmier dattier

Dans ce qui suit, la dénomination utilisée est la suivante :

BFC X-Y-Z béton de fibre conservé à air libre mais couvert par toile de jute, ayant un pourcentage massique de fibres égal à X, Y est la longueur en millimètre de ces fibres, Z est le pourcentage de chargement à la rupture (essai fluage en flexion)

Exemple : BFC 0.4% – 60-10% : béton de fibre ayant un pourcentage massique de fibres égal à 0.4%, de longueur de 60mm, et le pourcentage de chargement à la rupture est égal à 10% et couvert par toile de jute.

BFNC X-Y-Z béton de fibre conservé à air libre, ayant un pourcentage massique de fibres égal à X, Y est la longueur en millimètre de ces fibres, Z est le pourcentage de chargement à la rupture (essai fluage en flexion)

Exemple : BFNC 0.4% – 60 -10% : béton de fibre ayant un pourcentage massique de fibres égal à 0.4% et de longueur de 60mm, le pourcentage de chargement à la rupture égal à 10%

4-5-1. Application du modèle Loukili pour le béton ordinaire

Nous rappelons que les détails du calcul de ce modèle sont donnés au troisième chapitre. Le fluage est modélisé par la formule (3 -73)

$$\varepsilon_s = K(t_0).f(t-t_0)+h(t_0) \quad (3 -73)$$

Sans aucun changement, on applique le modèle LOUKILI pour le béton témoin utilisé par Merkhoufi pour modéliser le fluage.

Le tableau 4-14 donne les résultats de calcul en appliquant ce modèle.

En comparant les courbes de fluage (expérimentale, et modélisées) (fig. 4-14), on remarque que l'allure des courbes est presque la même, et les prévisions théoriques de fluage en fonction du temps sont proches des expériences, mais généralement ce modèle interprète bien les valeurs expérimentales spécialement après les 20 premiers jours. La divergence remarquée entre le modèle et les valeurs expérimentales avant cette période (20 jours) est peut être liée au type de béton utilisé qui est un béton ordinaire. En effet, le modèle LOUKILI est un modèle développé initialement pour un BHP.

Tableau 4-14 : Fluage de béton ordinaire : (Taux de chargement=10%)

t-t ₀ (jours)	f(t-t ₀)	Conservation à air libre			Couverture par toile de jute et arrosage		
		Def. Fluage réel	Def. Fluage modèle	TV(%)	Def. Fluage réel	Def. Fluage modèle	TV(%)

0	0	0.07	0.1955	-64.19	0.07	0.1955	-64.19
1	0.1	0.111	0.216	-48.61	0.11	0.216	-49.07
2	0.108	0.12	0.217	-44.70	0.144	0.217	-33.643
3	0.108	0.17	0.232	-26.72	0.17	0.232	-26.72
7	0.229	0.2	0.24	-16.66	0.195	0.24	-18.75
14	0.296	0.245	0.25	-2.00	0.235	0.25	-6.00
21	0.34	0.265	0.26	1.92	0.255	0.26	-1.92
41	0.418	0.295	0.28	5.35	0.322	0.28	15.00
110	0.541	0.32	0.3	6.66	0.39	0.3	30.00

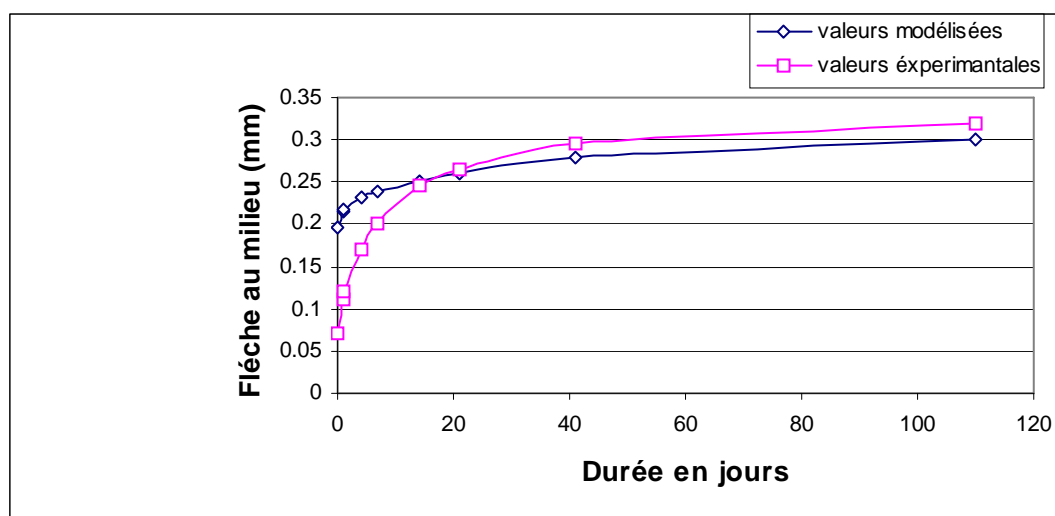


Figure 4-14: Estimation de fluage de béton témoin, conservé à air libre par le modèle Loukili (Taux de chargement=10%)

4-5-2. Adaptation du modèle Loukili pour le béton de fibres de palmier dattier

L'application de la théorie de prévision de Loukili pour le béton témoin de Merkhoufi, nous permis de calculer le fluage théorique d'un béton ordinaire, en se basant sur la connaissance de la fonction d'évolution de fluage $f(t-t_0)$

Vu la corrélation acceptable obtenue à partir du modèle LOUKILI pour le béton classique, dans ce qui suit nous essayons d'établir une extension de ce modèle pour les bétons de fibres de palmier. Tout d'abord, nous introduisons deux facteurs importants qui tiennent compte de l'influence de la présence des fibres sur le comportement du fluage de béton renforcé par les fibres de palmier dattier, ces facteurs sont :

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

Nous proposons pour déterminer le fluage ε_f d'un béton renforcé par les fibres de palmier dattier le modèle (AKCHICHE – KRIKER – CHACHA) suivant :

$$\varepsilon_f = \alpha \cdot \varepsilon_0 V_f \frac{l}{d_m}$$

(4-6)

Avec :

ε_0 : le fluage du témoin (calculé par le modèle Loukili)

V_f : le volume massique des fibres (%)

l : longueur des fibres incorporée

d_m : le diamètre moyen des fibres ($d_m=0.45$) [4]

$$\alpha = \begin{cases} 0.7 & \text{à } t-t_0 < 3 \text{ jours} \\ 1.6 & \text{à } t-t_0 \geq 3 \text{ jours} \end{cases}$$

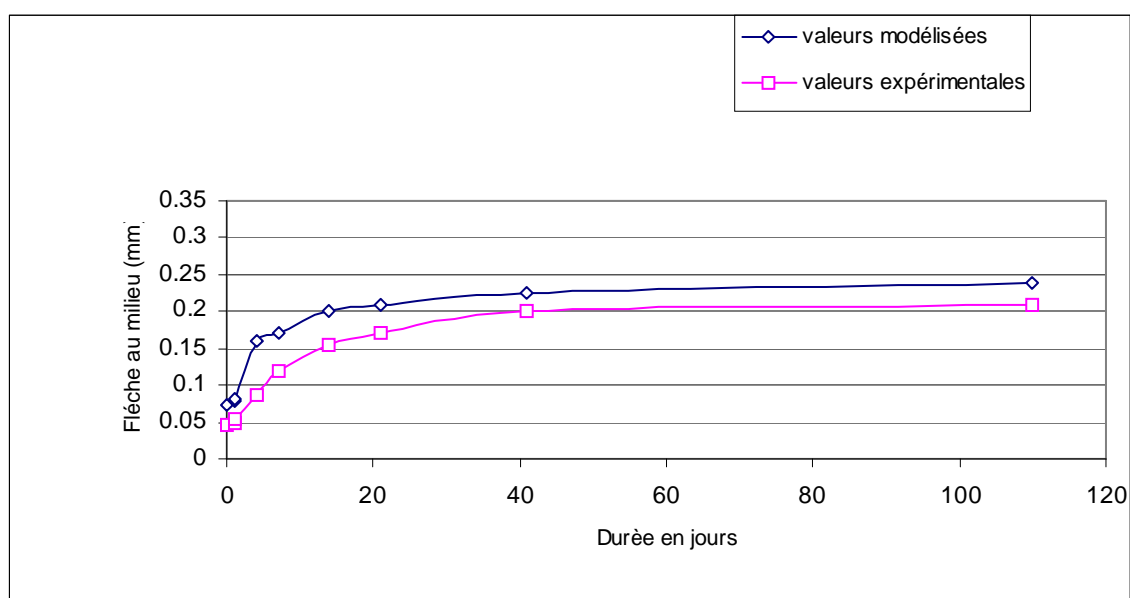
Le facteur α a pour but de corriger la divergence remarquée entre le modèle et les valeurs expérimentales durant les premiers jours de chargement. En effet, durant cette période (les premiers jours de chargement) plusieurs paramètres telle que l'instabilité des dispositifs expérimentaux peuvent causer des incertitudes dans les valeurs mesurées. De ce fait, même MERKHOUI a remarqué une grande dispersion dans ces résultats à $(t-t_0) \leq 03$ jours.

Les figures (4-15: a-f) et les tableaux 4-15 donnent les résultats de l'application de la formule (4-6)

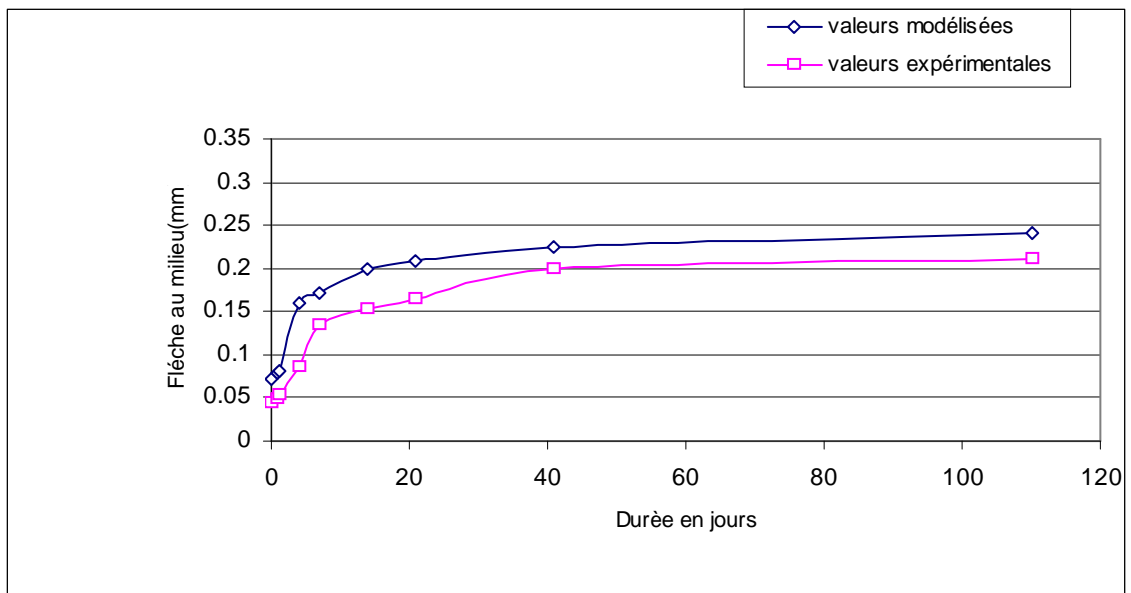
Tableau 4-15 : Fluage de béton de fibre de palmier dattier (Loukili modifié)

(t-t ₀) jours	BFC 0.4%-60-10%			BFNC 0.4%-60-10%			BFC 0.4%-60-30%		
	ε	ε modèle	TV %	ε	ε modèle	TV %	ε	ε modèle	TV %
0	0.0448	0.0723	-61.46	0.044	0.072335	-64.3	0.045	0.0723	-60.74
1	0.048	0.07992	-66.5	0.048	0.07992	-66.5	0.0499	0.07992	-60.16
2	0.0549	0.08029	-46.24	0.054	0.08029	-48.6	0.055	0.08029	-45.98
3	0.086	0.09	-4.65	0.085	0.09	-5.88	0.088	0.09	-2.27
7	0.12	0.172	-43.33	0.135	0.172	-27.40	0.13	0.172	-32.30
14	0.154	0.2	-29.87	0.153	0.2	-30.71	0.154	0.2	-29.87
21	0.17	0.208	-22.35	0.165	0.208	-26.06	0.168	0.208	-23.80
41	0.2	0.224	-12	0.2	0.224	-12	0.198	0.224	-13.13
110	0.21	0.24	-14.28	0.21	0.24	-14.28	0.215	0.24	-11.62

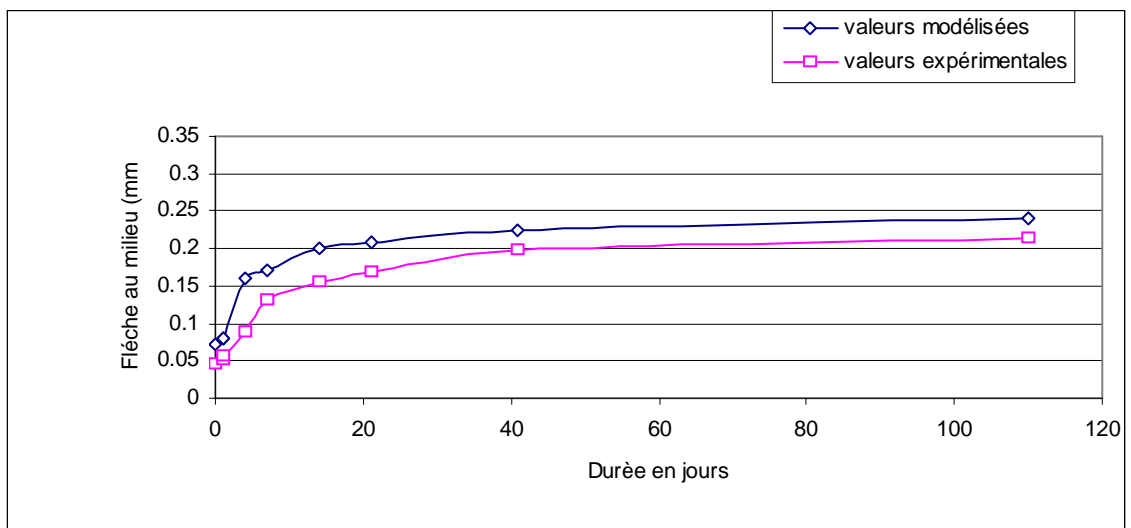
(t-t ₀) jours	BFC 0.4%-60-50%			BFC 0.4%-80-10%			BFC 0.4%-40-10%		
	ε	ε modèle	TV %	ε	ε modèle	TV %	ε	ε modèle	TV %
0	0.047	0.027	41.74	0.02	0.09579 5	-378.975	0.01	0.04692	-369.2
1	0.05	0.041	16.38	0.03	0.10584	-252.8	0.03	0.05184	-72.8
2	0.0552	0.059	-7.24	0.08	0.10633	-32.91	0.04	0.05208	-30.2
3	0.09	0.095	-5.55	0.11	0.15	-36.36	0.06	0.1392	-132
7	0.149	0.19	-29.9	0.14	0.17	-21.42	0.098	0.14	-42.85
14	0.169	0.20	-20.7	0.17	0.2	-17.64	0.11	0.159	-44.54
21	0.178	0.20	-17.3	0.185	0.22	-18.91	0.13	0.165	-26.92
41	0.2	0.22	-12.4	0.23	0.25	-8.69	0.145	0.17	-17.24
110	0.22	0.24	-10.9	0.29	0.3	-3.44	0.17	0.18	-5.88



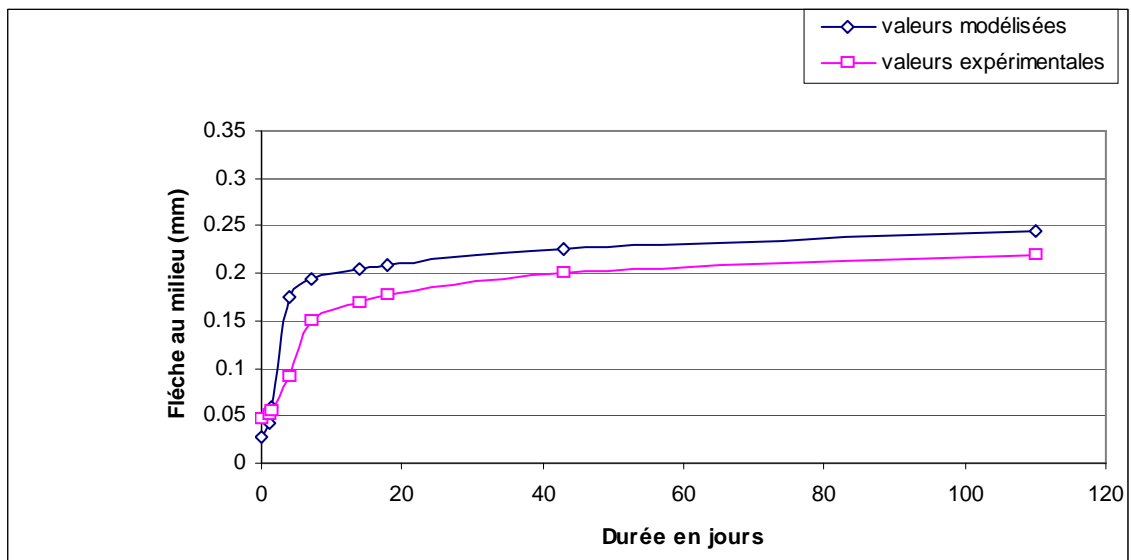
(a) : BFC 0.4%-60-10%



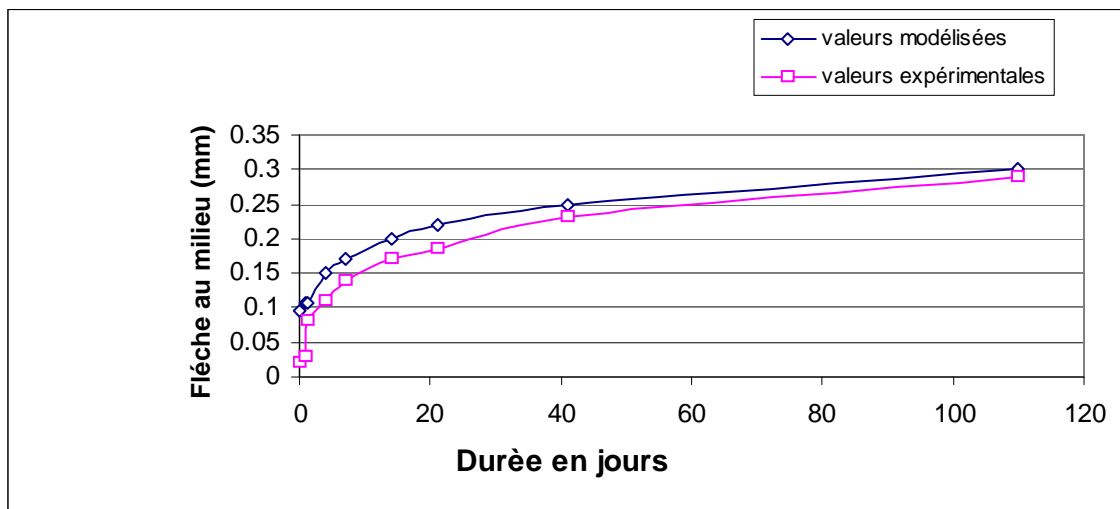
(b) : BFNC 0.4%-60-10%



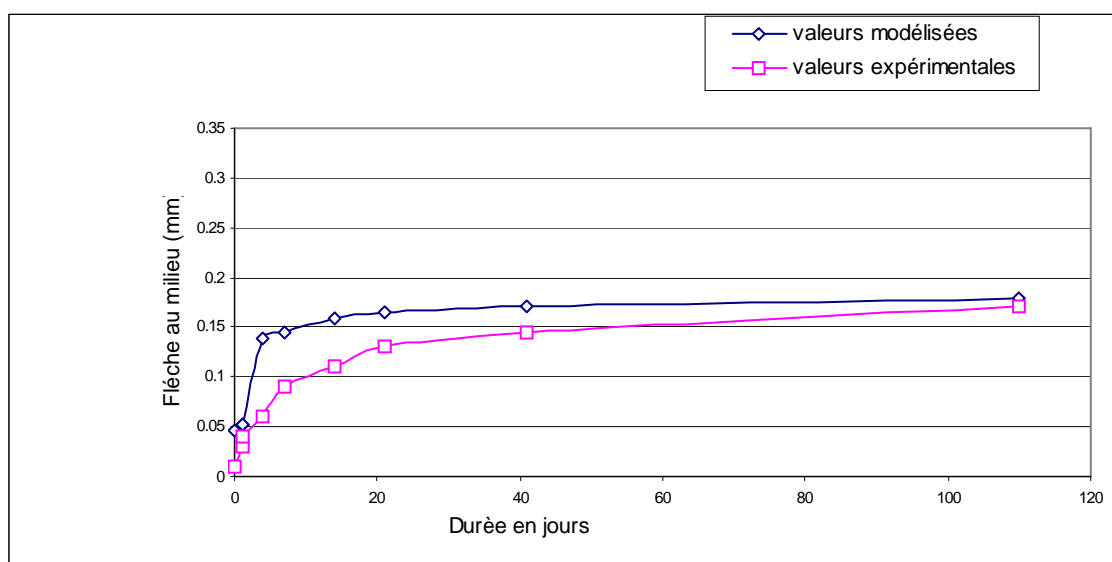
(c) : BFC 0.4%-60-30%



(d) : BFC 0.4%-60-50%



(e) : BFC 0.4%-80-10%



(f) : BFC 0.4%-40-10%

Figure 4-15: Estimation du fluage de béton de fibre de palmier dattier

Les figures (4-15) montrent une corrélation acceptable entre le modèle proposé et les résultats expérimentaux.

Pour les premiers jours de chargement, nous remarquons une surestimation des résultats, mais après 20 jours une convergence acceptable est obtenue.

De ce fait, on peut dire que ce modèle peut interpréter d'une façon acceptable le fluage des bétons de fibre de palmier dattier à moyen et long terme. Nous suggérons que des études expérimentales complémentaires restent indispensables pour mieux prendre en considération dans les modèles les phénomènes observés.

4-5-3. Adaptation du modèle Mangat et Azarie pour le fluage de béton de fibres de palmier dattier

En vue de la modélisation du fluage de béton renforcé par les fibres de palmier dattier, sous sollicitation de flexion, à partir de la théorie proposée par Mangat et Azarie, à travers les équations citées au troisième chapitre.

L'application de l'expression (3-100) exige la détermination des facteurs : μ , α , et E_E , rappelons que cette expression est de la forme suivante :

$$\varepsilon_{fc} = \varepsilon_{0c} - \frac{0.67241 \alpha^2 \mu (\varepsilon_{0s} + \varepsilon_{01}) \left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2} \right)}{\left\{ \left[\frac{\left(\frac{s}{2} \right)^2 + \left(\frac{d}{2} \right)^2}{\left(\frac{s}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} + \nu \right] + \frac{(1 - \nu_s)}{E_s / E_B} \right\} (0.411 + s)}$$

Pour pouvoir appliquer l'équation (3-100), nous avons réalisé des essais mécaniques sur les fibres de palmier. Les essais de traction sur des échantillons de 30 fibres, de longueur 80 mm, 60mm, et 40mm (10 par chaque longueur) sur une machine de traction type : CARLE FRANK GMBH voir annexe (photos 03 et 04) fonctionnant à déplacement contrôlé, nous ont permis d'obtenir les résultats du module élastique E_f et coefficient de poisson ν_f (tableau 4-16) :

Tableau 4-16 : module élastique et coefficient de poisson des fibres de palmier

longueur de fibre l_f (mm)	80	60	40
E_f (Gpa)	4.75 ± 3.0	5.20 ± 3.0	5.12 ± 2.0
ν_f	0.3	0.3	0.3

- Les valeurs de μ sont obtenues par l'expression (3-58), vu que ces valeurs sont sensiblement proches, d'où on prend la valeur moyenne pour faciliter les calculs, cette valeur de μ est prise égale à 0.022
- Les valeurs du module d'élasticité du béton sont déterminées à partir de l'expression : $E_B = 4.5 f_c^{1/2}$ [23], qui donnent une valeur de $E_B = 25000$ Mpa.
- Le retrait libre du béton témoin ε_{of} c'est la valeur du retrait limite est déterminé au cours d'essais expérimentaux de retrait.
- L'espacement s est déterminé par la formule (3-57), on prend $s = 10$ mm
- Le diamètre $d = d_{moy} = 0.45$ mm

En remplaçant tous les paramètres déterminés dans l'équation (3-100)

Pour avoir une corrélation acceptable par ce modèle, nous proposons le changement du coefficient 0.6724 par 0.800. Le modèle modifié devient :

$$\varepsilon_f = \varepsilon_0 - \frac{0.8001 \alpha^2 \mu (\varepsilon_{of} + \varepsilon_{01}) \left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2} \right)}{\left\{ \left[\frac{\left(\frac{s}{2} \right)^2 + \left(\frac{d}{2} \right)^2}{\left(\frac{s}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} + \nu \right] + \frac{(1 - \nu_f)}{E_f / E_B} \right\} (0.411 + s)}$$

D'où :

Pour $l=80\text{mm}$, $\epsilon_f = \epsilon_0 - 0.088$

Pour $l=60\text{mm}$, $\epsilon_f = \epsilon_0 - 0.112$

Pour $l=40\text{mm}$, $\epsilon_f = \epsilon_0 - 0.152$

Remarque : Les quelques valeurs négatives pour $(t-t_0) \leq 02$ jours sont prises en valeur absolue
Le tableau 4-17 donne les résultats de calcul en appliquant le modèle Mangat et Aazarie modifié.

Tableau 4-17 : Fluage de béton de fibre de palmier (Mangat et Azarie modifié)

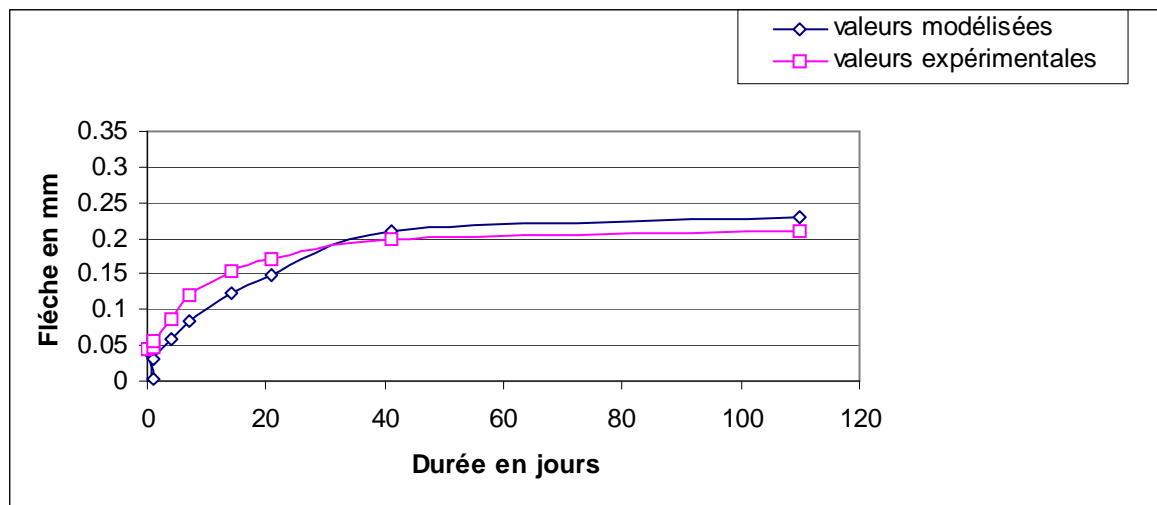
	10%	BFC 0.4%-60-10%				30%	BFC 0.4%-60-30%			
(t-t ₀) jours	Fluage de témoin ϵ_0	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	$I \epsilon_{\text{modèle}} I$	TV %	Fluage de témoin ϵ_0	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	$I \epsilon_{\text{modèle}} I$	TV %
0	0.07	0.0448	-0,042	0.042	6.2	0,07	0,045	-0,042	0,042	6,6
1	0.115	0.048	0,003	0.003	93.7	0,111	0,0499	-0,001	0,001	97,9
2	0.144	0.0549	0,032	0.032	41.7	0,15	0,055	0,038	0,038	30
3	0.17	0.086	0,058	0.058	32.0	0,172	0,088	0,06	0,06	31,8
7	0.195	0.12	0,083	0.083	30.8	0,2	0,13	0,088	0,088	32,3
14	0.235	0.154	0,123	0.123	20.1	0,245	0,154	0,133	0,133	13,6
21	0.26	0.17	0,148	0.148	12.0	0,265	0,168	0,153	0,153	8,9
41	0.322	0.2	0,21	0.21	-5.0	0,325	0,198	0,213	0,213	-7,5
110	0.39	0.21	0,23	0.23	-9.5	0,396	0,215	0,22	0,22	-2,32

	50%	BFC 0.4%-60-50%				BFC 0.4%-80-10%			
(t-t ₀) jours	Fluage de témoin ϵ_0	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	$I \epsilon_{\text{modèle}} I$	TV %	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	$I \epsilon_{\text{modèle}} I$	TV %
0	0,074	0,047	-0,038	0,038	19,1	0,02	-0,018	0,018	10
1	0,113	0,05	0,001	0,001	98	0,03	0,027	0,027	10
2	0,16	0,0552	0,048	0,048	13,0	0,08	0,056	0,056	30
3	0,172	0,09	0,06	0,06	33,3	0,11	0,082	0,082	25,4
7	0,22	0,149	0,108	0,108	27,5	0,14	0,107	0,107	23,5
14	0,248	0,169	0,136	0,136	19,5	0,17	0,147	0,147	13,5
21	0,27	0,178	0,158	0,158	11,2	0,185	0,172	0,172	7,02
41	0,33	0,2	0,218	0,218	-9	0,23	0,234	0,234	-1,7
110	0,41	0,22	0,24	0,24	-9,0	0,29	0,302	0,302	-4,13

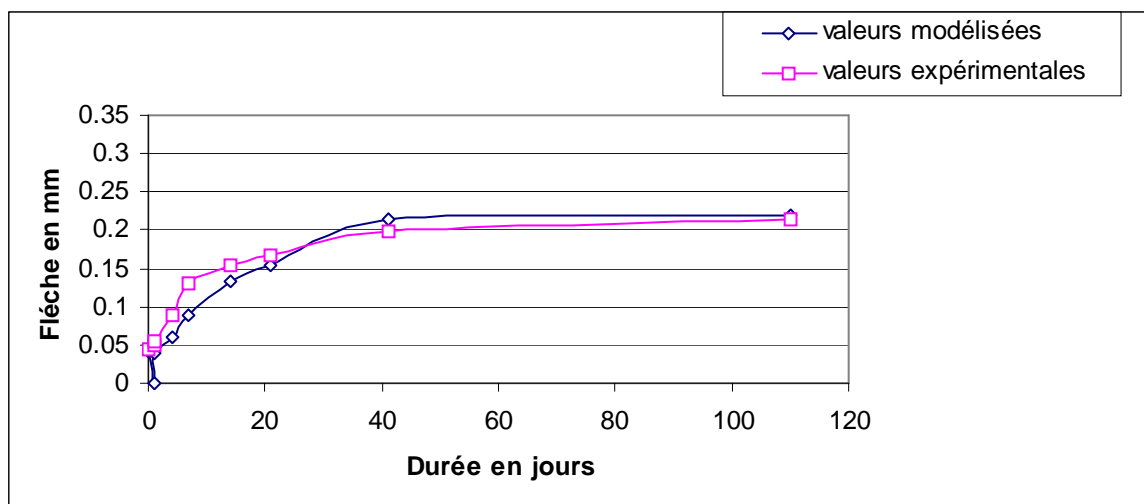
	BFC 0.4%-40-10%			
t-t ₀ (jours)	ϵ	$\epsilon_{\text{modèle}}$	$I \epsilon_{\text{modèle}} I$	TV %
0	0,02	-0,030	0,030	-50
1	0,03	-0,037	0,037	-23,3
2	0,04	-0,008	0,008	80
3	0,06	0,018	0,018	70
7	0,09	0,043	0,043	52,2
14	0,11	0,083	0,083	24,5
21	0,13	0,108	0,108	16,9

41	0,145	0,17	0,17	-17,2
110	0,17	0,2	0,2	-17,64

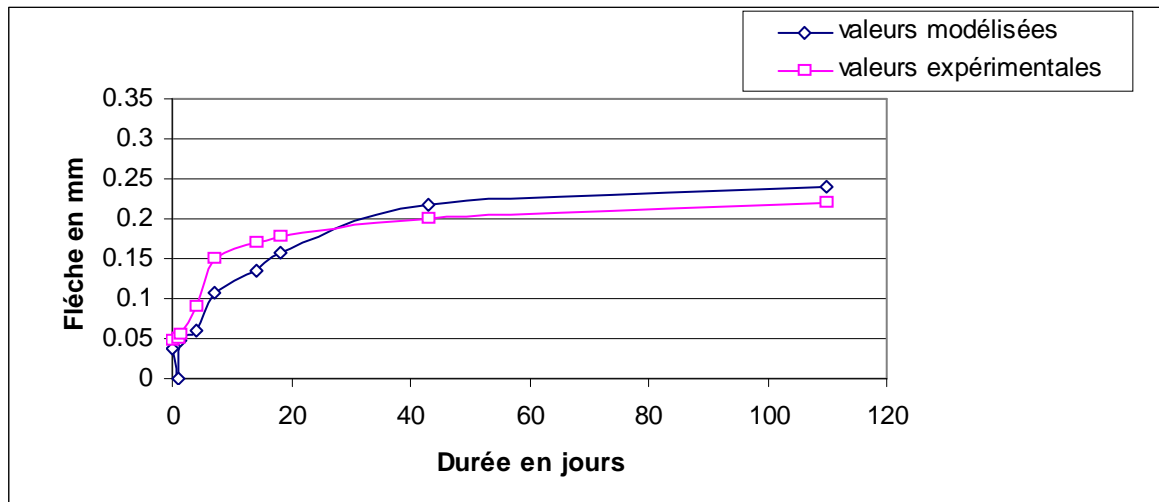
Les figures (4-16 : a-e) donnent les résultats de l'application de ce modèle modifié



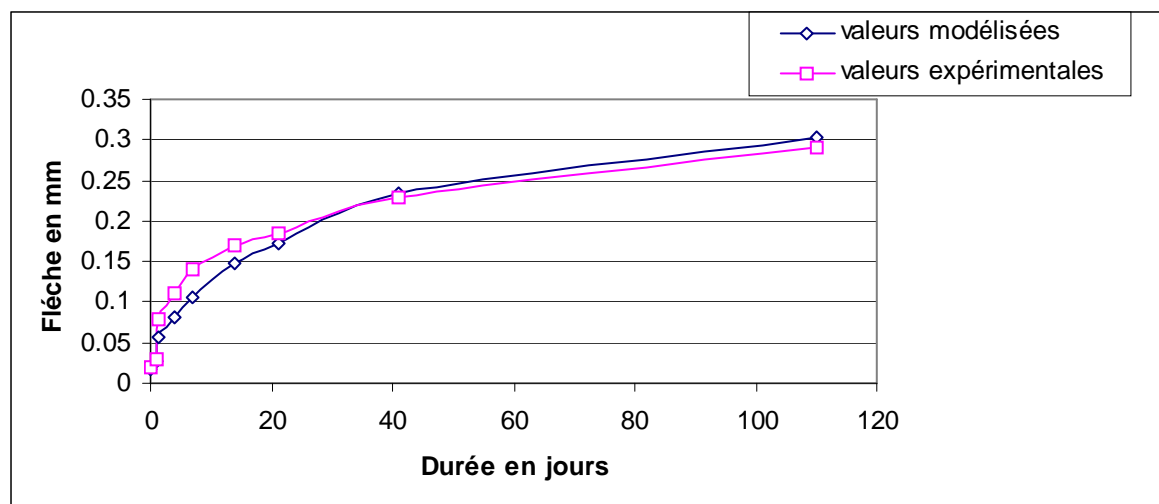
(a) : BFC 0.4%-60-10%



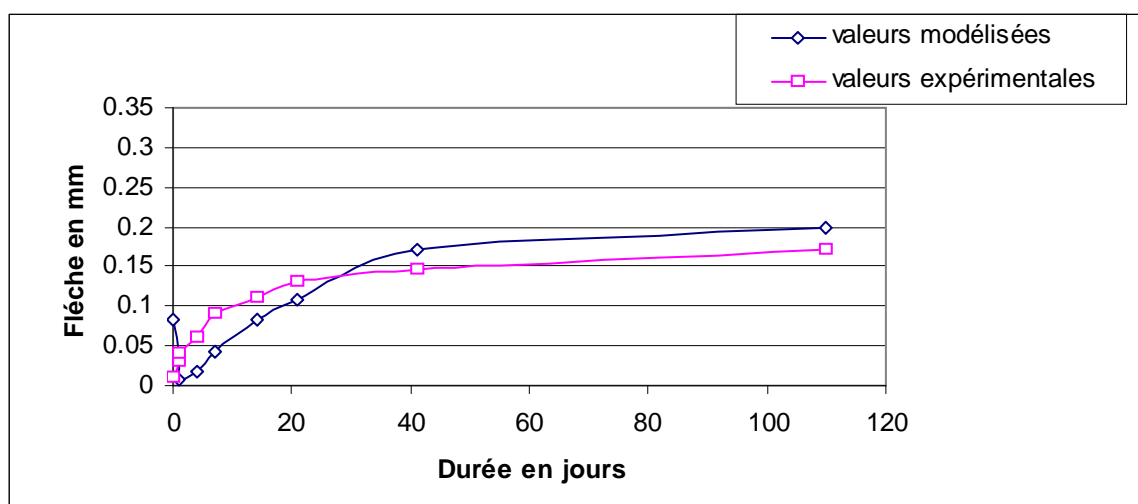
(b) : BFC 0.4%-60-30%



(c) : BFC 0.4%-60-50%



(d) : BFC 0.4%-80-10%



(e) : BFC 0.4%-40-10%

Figure 4-16 : Estimation du fluage de béton de fibre de palmier dattier par Mangat et Azarie

En comparant les courbes de fluage modélisées et expérimentales (figures 4-16), on remarque que :

- Les courbes théoriques ont les mêmes allures que les courbes expérimentales,
- Une sous-estimation du fluage de béton de fibre à un âge de chargement inférieur à 41 jours.
- Une surestimation du fluage de béton de fibre à un âge de chargement supérieur à 41 jours.
- L'intersection entre les valeurs théoriques et expérimentales est située généralement dans l'intervalle du temps compris entre 20 à 40 jours.
- Une bonne corrélation est obtenue généralement pour une durée supérieure à 20 jours

4-6. Conclusion :

Dans la littérature, il existe plusieurs lois qui modélisent le retrait et le fluage du béton classique et du béton de fibre d'acier. Ce n'était pas le cas pour les fibres végétales notamment les fibres de palmier dattier d'où la nécessité de développer plus de lois qui interprètent le comportement de ce type de fibres.

Dans ce chapitre nous avons effectué les points suivants :

- Présentation en détails des données expérimentales en précisant, les diverses compositions des matériaux utilisés, les conditions de la cure, et les modes de

conservations exigées durant les essais effectués par les deux chercheurs KRIKER et MERKHOUI.

- Regroupement de l'ensemble des résultats obtenus lors des essais pour avoir l'influence des différents paramètres cités dans la recherche bibliographique.
- Modélisation des résultats expérimentaux du retrait et du fluage du béton et mortier de palmier dattier.

Deux modèles sont proposés pour la prédiction du retrait en prenant comme base les modèles de YOUNG et CHERN, et de HOUARI, mais en effectuant quelques modifications pour faire intervenir les propriétés des bétons et des fibres de palmier. Deux autres modèles sont aussi proposés pour la modélisation du fluage, élaborer sur la base d'une modélisation de deux modèles à savoir le modèle de LOUKILI et de MANGAT et AZARIE bien sûr en faisant intervenir les propriétés des bétons de fibres de palmier dattier.

D'après nos résultats sur la modélisation du retrait, nous notons 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. Toutes en introduisant les facteurs essentiels des bétons de fibre qui sont : V_f , et l/d .

Cependant, nous pensons 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 du retrait du béton témoin ; il suffit de connaître la composition du béton et le mode de conservation, ce qui rend son utilisation plus facile.

Pour la modélisation du comportement en fluage des bétons de fibres de palmier, nous avons élaboré deux modèles qui sont obtenus après modification des modèles de LOUKILI et celui de MANGAT et AZARIE. Tout en introduisant les caractéristiques propres au béton de fibres de palmier et aussi les caractéristiques de fibres de palmier. Il faut noter qu'en général les deux modèles proposés donnent une bonne corrélation spécialement pour les durées $(t-t_0)$ supérieures à 20 jours.

CONCLUSIONS GENERALES
ET
RECOMMANDATIONS

Conclusions générales et recommandations

La modélisation du comportement de retrait et fluage des bétons de fibre de palmier a été l'objet de ce mémoire, cette étude sur ce nouveau matériau nécessite une recherche bibliographique assez poussée pour une bonne compréhension de : la formulation, les caractéristiques, et les propriétés des différentes composantes de ce matériau.

L'étude bibliographique a mis en évidence la rareté des modèles propres à ces deux phénomènes pour les bétons de fibres végétales. Quoiqu'il existe quelques modèles propres aux bétons de fibres métalliques.

Ainsi dans ce mémoire nous avons essayé de présenter quelques relations pour modéliser les résultats expérimentaux obtenus par les deux chercheurs KRIKER et MERKHOUI sur le retrait et fluage des bétons et mortiers de fibres de palmier dattier.

Nous rappelons qu'il n'existe, dans la synthèse bibliographique présentée, aucun modèle propre aux bétons ou mortiers de fibres végétales, tous les modèles présentés sont propres aux bétons classiques et à la limite au béton de fibres métalliques.

Selon les données expérimentales disponibles, nous avons retenu quatre (04) modèles : deux pour le retrait, et deux autres pour le fluage.

Dans ce qui suit nous allons donner les conclusions principales propres au retrait et fluage des bétons de fibre de palmier.

Pour le retrait de béton de fibre de palmier :

Les modèles retenus sont ceux de HOUARI et de YOUNG et CHERN. La modification de ces deux modèles en faisant intervenir les propriétés de béton de fibre.

- Modèle de HOUARI modifié :

$$\varepsilon_{fs} = \varepsilon_{0s} \cdot \left(1 - 0.046 \cdot V_f \cdot \frac{1}{d_m}\right)$$

- Modèle de YOUNG et CHERN modifié :

Il est possible d'adapter le modèle de Young et Chern pour modéliser le comportement du retrait du béton et même de mortier renforcé par les fibres de palmier dattier par l'incorporation d'une fonction $F(t)$ et un facteur Q donnés par les formules suivantes :

$$\begin{cases} F(t) = 1.625 - 0.00362 \cdot t & \text{pour } t \leq 28 \text{ jours} \\ F(t) = 0.751 - 0.0036 \cdot t & \text{pour } t > 28 \text{ jours} \end{cases}$$

$$Q = \frac{2.69 \cdot F(t)}{s} \cdot t$$

De ce fait, la formule proposée pour l'évaluation du retrait de béton et mortier de fibres de palmier dattier est donnée par :

$$\varepsilon = Kh \cdot Q \cdot \varepsilon_u$$

L'application de ces deux modèles nous a donné de bonne corrélation entre les données expérimentales et les données modélisées.

Pour le fluage de béton de fibre de palmier :

Deux modèles sont aussi élaborés sur la base d'une modification de deux modèles existant à savoir le modèle de LOUKILI qui est initialement appliqué pour les BHP et le modèle de MANGAT et AZARIE qui est initialement utilisé pour les bétons de fibres métalliques.

Les modèles que nous avons proposé :

- Modèle de LOUKILI modifié :

$$\varepsilon_f = \alpha \cdot \varepsilon_0 \cdot V_f \frac{1}{d_m}$$

Avec :

$$\alpha = \begin{cases} 0.7 & \text{à } t-t_0 < 3 \text{ jours} \\ 1.6 & \text{à } t-t_0 \geq 3 \text{ jours} \end{cases}$$

$$\varepsilon_0 = K(t_0) \cdot f(t-t_0) + h(t_0)$$

$$K(t_0) = 19 \exp. \sqrt{\frac{0.1}{t_0 - 2.65}}$$

$$f(t-t_0) = \frac{\sqrt{\frac{t-t_0}{3t_0-5}}}{1 + \sqrt{\frac{t-t_0}{3t_0-5}}}$$

$$h(t_0) = 18 \exp. \sqrt{\frac{0.2}{t_0 + 1.2}}$$

- Modèle de MANGAT et AZARIE modifié

$$\varepsilon_f = \varepsilon_0 - \frac{0.8001 \alpha^2 \mu (\varepsilon_{0f} + \varepsilon_{01}) \left(\frac{s}{2} - \frac{d}{2} \right)}{\left\{ \left[\frac{\left(\frac{s}{2} \right)^2 + \left(\frac{d}{2} \right)^2}{\left(\frac{s}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2} + \nu \right] + \frac{(1 - \nu_f)}{E_f / E_B} \right\} (0.411 + s)}$$

L'application de ces deux modèles nous a donné de bonne corrélation entre les données expérimentales et les données modélisées

Nous pouvons donc dire qu'actuellement la modélisation des deux phénomènes rhéologiques (retrait et fluage) de béton renforcé par les fibres de palmier dattier est possible il reste seulement d'élargir le cercle de cette étude par des modèles assez précis.

Recommandations :

Malgré les difficultés rencontrées, nous recommandons pour ceux qui désirent utiliser nos modèles de prévision du retrait ou du fluage, ainsi aux futurs chercheurs ce qui suit :

- Poursuivre cet axe de recherche par une confrontation de nos résultats avec d'autres chercheurs dans le but d'une bonne validation de nos modèles.
- Avoir une forme numérique pour la fonction F(t) pour éviter l'application des formules empiriques dans l'étude de retrait.
- Adaptation du modèle de Shekarchi-Debiki sur le fluage du béton de fibre de palmier dattier par l'introduction d'un calcul numérique assez poussé.
- Intensifier les efforts pour des études complémentaires avec une grande précision, sur les paramètres influençant sur le retrait et le fluage, afin d'avoir une bonne modélisation des résultats.

Enfin nous souhaitons que nos résultats obtenus soient susceptibles d'estimer le retrait et le fluage des bétons et des mortiers de fibre de palmier à partir de la connaissance des données de base, nous espérons que notre travail contribuera à l'élargissement du champ d'utilisation des bétons et mortiers de fibres de palmier dattier dans le domaine de la construction.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MERKHOUI 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.
- [2] ABANI S. "Caractérisation et durabilité des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier "mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2003, PP67.
- [3] DREUX. G et FESTA. J. "Nouveau guide du béton", édition EYROLLES, Mai 1998
- [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 d'Etat, 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", Progressa in polymère science, 24, 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 de matériaux cimentaire 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 reinforced concrete ". ELSEVIER. Ciment and concrète 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] KEDJOUR NE. , "Propriétés et pathologie du béton", office de publications universitaires ALGER 1993 PP275(129)
- [22] ADAM M.NEVILLE, "Propriétés des bétons", CRIB. édition EYROLLES, Septembre 2000.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] SOROKA I., "Concrete In Hot Environments", Edition E & FN SPON, London, 1993.
- [28] 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.
- [29] HOUGET V. , "Etude des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de

- composites ciments-fibres organiques ”, Thèse de docteur, INSA Lyon , 1992.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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).
- [33] KANNA V., OLSON R.A., and JENNINGS H.M., "Effect of shrinkage and moisture concrete on the physical characteristics of blended cement mortars", Cement And Concrete research vol.28,N°.10, pp. 1467-1477, 1998.
- [34] HEMMERLE J. P., S.MARTI., "Etude et modélisation du comportement d'une poutre en béton de fibres en flexion simple"INSA , Lyon , Juin 1995.
- [35] BEAUDOIN J.J., "Béton renforcé de fibres", IRC ,Digeste de la construction au Canada, 05/01/1999.
- [36] MICHAUD P.M., GEORGIN J.F., MARCHAND J., BISSONNETTE B., REYONOUARD J.M. "Modélisation des couplages chemo-poro-visco-élastiques du béton au jeune age en conditions isothermes et sans échange hydrique", 6^{ème} édition des journées scientifiques du regroupement Francophone pour la recherche et la formation sur le béton, Lyon, 4 -5 Juillet 2005.
- [37] ACKER P., LCPC, "Mesure des déformations différées du béton chargé en compression"mode opératoire des LCPC, Juin 1997.
- [38] SHEKARCHIZADEH M., "Calcul par méthode itérative, du fluage en flexion d'une poutre en béton", Rapport D.E.A INSA, Lyon , Juillet 1993.
- [39] EL-HACHEM,M., " Etude de l'influence de la fibre de fonte amorphe sur le retrait et le fluage du béton ", thèse de doctorat , école central paris, 1993.
- [40] BALAGURU.P., RAMAKRISHNAN, "Fiber reinforced concrete properties : workability , behavior under long-term loading and air-void characteristics ", ACI materials journal, vol. 85, N° 3 pp. 189-196, 1988.
- [41] THEODORAKPOULOS. D.D "Creep characteristics of glass reinforced cement under flexural loading "ELSEVIER ,cement and concrete composite, vol. 17, pp. 267-279, April 1995.
- [42] KACI S ., CHACHOUR K., "Etude du fluage du béton de fibres métallique (Influence de l'élanement des fibres)", Congrès international réhabilitation des

- constructions et développement durable, Alger, 3-4 Mai 2005.
- [43] HORACIO., "Fluage thermique et variation du module d'Young"
- [44] 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
- [45] ZIA P., WHITE R. N., DAVID A. VANHORN, "principles of model analysis", models for concrete structures
- [46] 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.
- [47] CTC Centre, "Modélisation numérique en structures et géomatériaux", La lettre: Revue algérienne, N° 26, Avril 2001.
- [48] ROSSI P. "les bétons de fibres métalliques "presse ENPC,France V.309, 1998.
- [49] BOINET J., "Prévision du module élastique des matériaux poreux : Influence des interaction", ANNALES du ITBTP, N°461, Série matériaux 72, Octobre 1989.
- [50] BOINET J., "Modélisation des matériaux composites par la méthode de éléments finis : déduction des relatives équivalentes des inclusions dans le cas des béton ", ANNALES du ITBTP, N°489, Décembre 1990.
- [51] 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
- [52] DIPRICO M., FELICETTI R., PLIZZARI G.A., "Fibre reinforced concrètes", RILEM, Italy , 20-22 Septembre 2004.
- [53] VANDEWALLE L., "Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions", ELSEVIER, Cement, concrete composites 22, pp201-208, 2000.
- [54] 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.
- [55] FERON C., "Etude des mécanismes de génération contraintes et de fissuration par retrait gène dans les structures a base se matériaux cimentaires", Thèse de Doctorat (spécialité génie civil), Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2002.
- [56] 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.

- [57] BISSOCHOP J., SHIOTANI T., and VAN MIER J.G.M., “Evaluation of shrinkage microcracking in concrete”, Cement and concrete research , 2003 article in press.

- [58] BISSOCHOP J. and VAN MIER J.G.M., “ How to study drying shrinkage microcracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy ”, Cement and concrete research , vol.32, pp.279-287, 2002.

- [59] 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

- [60] 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.

- [61] 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

ANNEXES

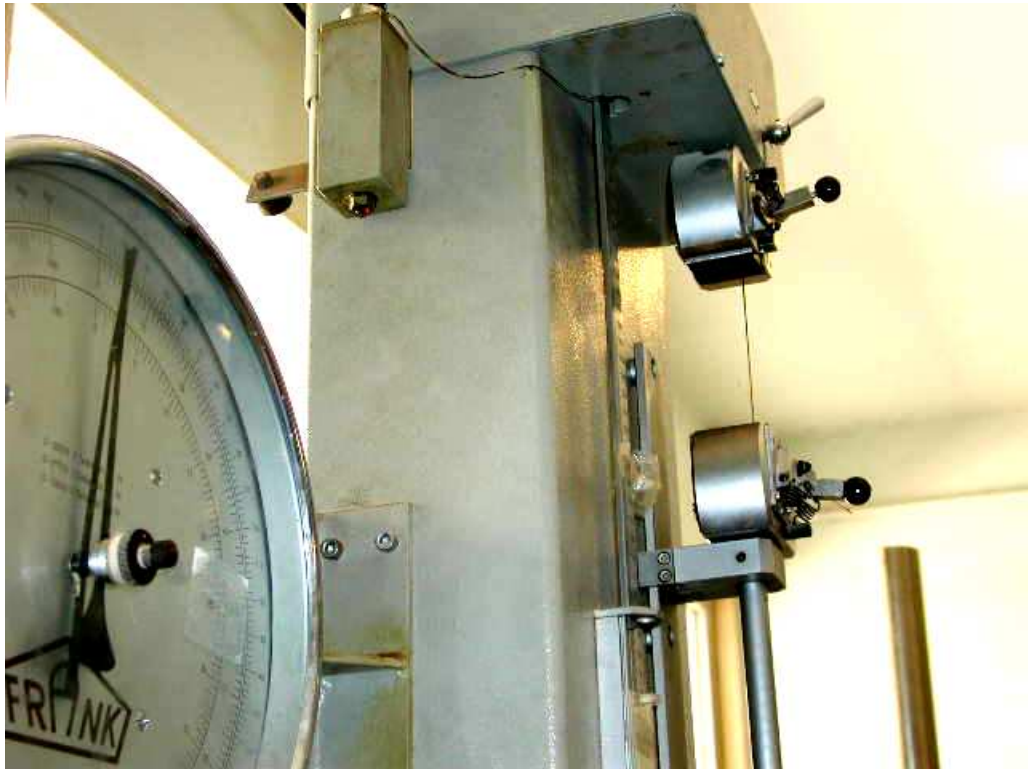


Photo 4-3. : Machine d'essai de traction des fibres

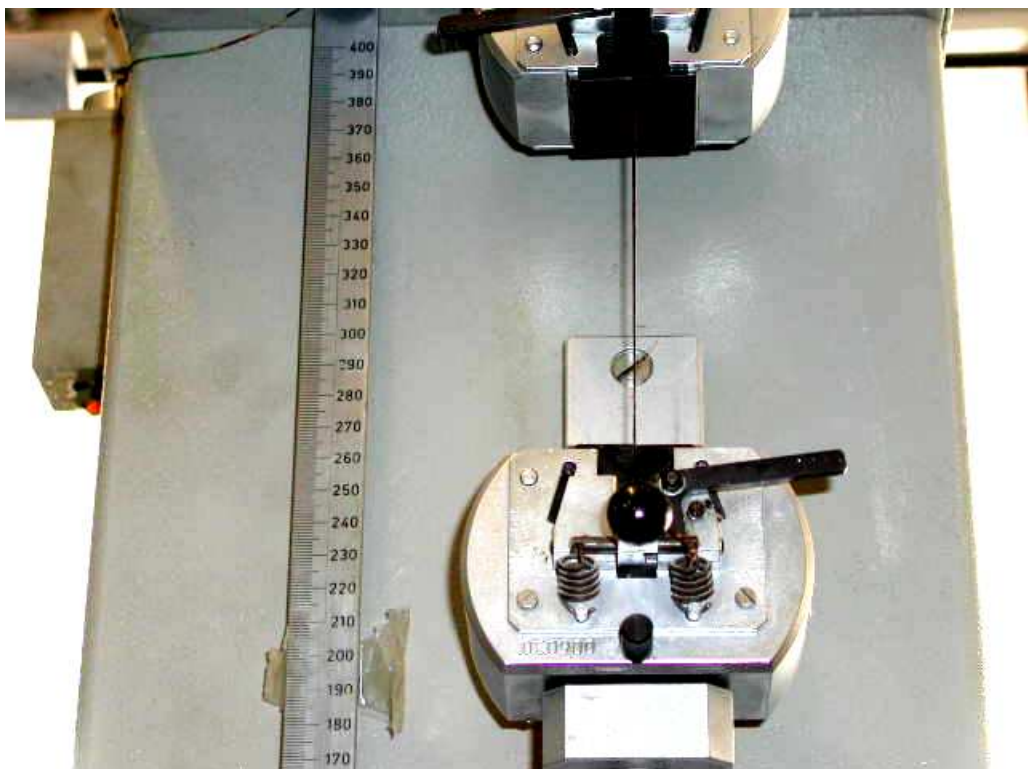


Photo 4-4. : Essai de traction sur la fibre de palmier dattier