EFFETS DE LA REPARTITION DES ARMATURES SUR L'EVOLUTION DES FLECHES DUES AU RETRAIT DANS LES STRUCTURES EN BETON ARME

Karim EZZIANE
Maître Assistant au Centre Universitaire de Chlef
Mohamed GHRICI
Maître Assistant au Centre Universitaire de Chlef
Abdelkader KADRI
Professeur au Centre Universitaire de Chlef

Résumé

Cette étude consiste à présenter certains essais représentants l'évolution des flèches dûes au retrait ; simples pour leurs réalisations et moins exigeants de matériels très spéciaux. Leurs choix et leurs conceptions ont été pris de telle façon que les effets différés du retrait seront séparés de ceux dûs au fluage. Le temps de mesure est limité à six mois ce qui représente 95% du retrait total (suivant le modèle donné par le BPEL 91).

Enfin, on présentera les résultats expérimentaux pouvant être utilisé pour contrôler la validité des modèles existants ou pour en développer de nouveaux modèles qui caractérisent mieux les matériaux et les conditions climatiques de l'Algérie.

Mots clés : béton • structure • retrait • comportement différé • redistribution • flèches différées • expérience.

1 INTRODUCTION

Le retrait du béton est un phénomène qui résulte de la diminution du volume apparent d'un élélment de béton dûe à la consommation d'une partie d'eau présente dans le béton dûe au séchage ou à la réaction d'hydratation [01].

Ce phénomène apparaît comme une déformation d'un élément de béton libre de toutes sollicitations mécaniques extérieures. On distingue ainsi, un retrait endogène ; provoqué par des phénomènes strictement internes au béton en absence de tout échange hydrique avec le milieu extérieur et un autre retrait qui résulte de la dessication au cours du durcissement de la quantité d'eau en excés.

L'influence de ce phénomène sur le comportement différé des structures en béton armé et sa prise en compte dans les calculs sont devenues d'une importance majeure, dont toute sous-estimation peut conduire à des flèches inadmissibles, une redistribution des efforts, incompatible avec les liaisons de la structure ou à des pertes de précontrainte qui peuvent rendre la structure très fragile. A nos jours des études de plus en plus poussées sont entamées [2, 3, 4] et des méthodes de calcul sont élaborées [5, 6, 7, 8] afin de lutter contre toute détérioration imprévue qui risque d'apparaître dans les ouvrages.

2 EFFETS STRUCTURAUX DU RETRAIT

2.1 Déformation dûe au retrait

Sur un élément de béton exposé à l'air libre (Figure 1), on observe une variation dimensionnelle qui évolue avec le temps avec vitesse décroissante jusqu'à une valeur limite appelée retrait final "εro" qui n'est généralement jamais atteinte.

La loi de cette variation est une fonction croissante du temps et dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la taille de l'élément, l'humidité relative et la température. Le BPEL 91 [09] propose le modèle suivant :

$$\varepsilon r\,(to, t) = \varepsilon ro\,[r(t) - r(to)] \qquad (1)$$

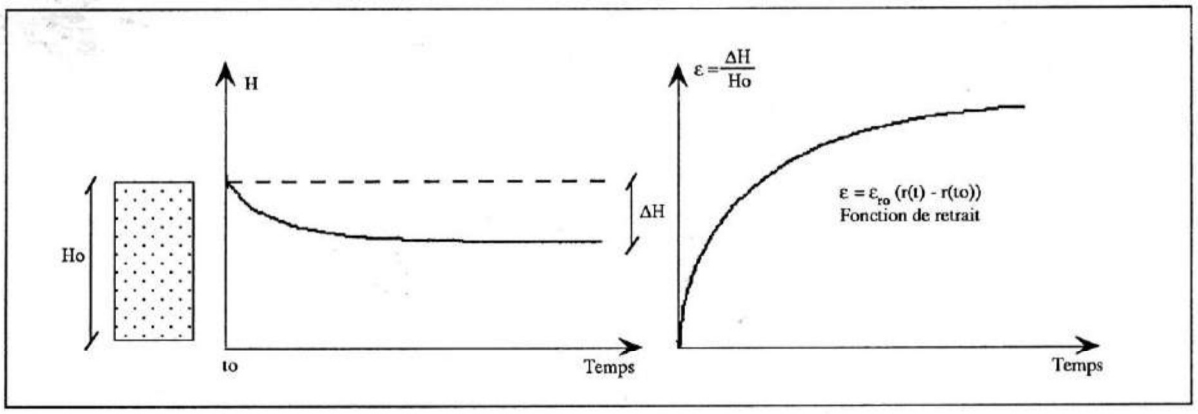


Figure 1 : Déformation dûe au retrait.

tels que :

$$\varepsilon ro = (100 - Rh)\left[6 + \frac{80}{10 + 3\ r_m}\right] 10^{-6}$$

$$r(t) = \frac{t}{t + 9\ r_m}$$

$$r_m = \frac{Sb}{P}$$

avec

- εro : le retrait final
- Rh : l'humidité relative
- Sb et P : l'aire et le périmètre de la section.

2.2 Contraintes dûes au retrait

La présence des armatures dans le béton entrave la libre évolution du retrait ; il en résulte une diminution de celui-ci ; une diminution qui sera d'autant plus grande que le pourcentage des armatures est important, ce qui engendre une mise en traction du béton et une compression des aciers.

Si ε_r est le retrait libre dans une éprouvette non armée, et $k_s\ \varepsilon_r$ le retrait produit pour une même éprouvette armée de $\rho_s = S_a/S_b$, le retrait empêché dans ce cas est égale à $(1\text{-}k_s)\ \varepsilon_r$.

La force de compression dans les aciers "Fa" est :

$$Fa = k_s\ \varepsilon_r\ Ea\ Sa \qquad (2)$$

La force de traction dans le béton "Fb" est :

$$Fb = (1\text{-}k_s)\ \varepsilon_r\ Eb\ Sb \qquad (3)$$

L'équilibre des forces dans la section ; entre l'équation 2 et 3 donne :

$$k_s = \frac{1}{1 + \rho s\ n} \qquad (4)$$

avec :

$$\rho s = \frac{Sa}{Sb} \qquad \text{et} \qquad n = \frac{Ea}{Eb}$$

La déformation d'un élément en béton armé ε_r^* est égale :

$$\varepsilon_r^* = \frac{1}{1 + \rho s\ n}\ \varepsilon_r \qquad (5)$$

La contrainte de compression dans les armatures "σa" :

$$\sigma a = \frac{Fa}{Sa} \qquad (6)$$

La contrainte de traction dans le béton "σb" :

$$\sigma b = \frac{Fb}{Sb} \qquad (7)$$

2.3 Flèches dûes au retrait

Lorsqu' une dissymétrie des armatures existe dans une section en béton armé, tel que le centre de gravité des armatures "Ga" est excentré de "d" par rapport au centre de gravité du béton "Gb" on obtient une certaine courbure dans la direction de la plus forte concentration des armatures (Figure 2). Ceci est dûe à un retrait gêné dans la partie la plus armée tandis qu'il évolue plus librement dans l'autre. Ce phénomène peut se produire dans un élément de béton composé de

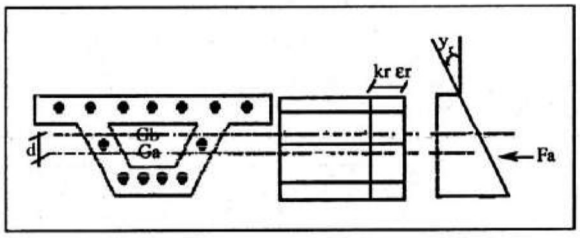


Figure 2 : Retrait différentiel dans une section avec les armatures dissymétriques.

deux couches de béton de différents retraits ; soit dû à une composition différente ou à des âges différents après une reprise de bétonnage, ce qui donne un retrait différentiel entre les couches du béton. Comme on peut l'observer également lorsqu'on faisait le revêtement des ponts en empêchant le retrait des faces supérieures de se produire tandis que celui des faces inférieures est toujours libre.

En utilisant la méthode de la force équivalente de traction [10], on obtient la force de compression Fa exercée sur les armatures qui sera égale à la tension causée par un retrait d'un béton avec des armatures symétriques et avec le même pourcentage (Equation 01).

Le point d'application de cette force coïncide avec le centre de gravité des armatures, ce qui donne un moment fléchissant dans la section égale à :

$$M = Fa.d \qquad (8)$$

Le comportement élastique de la section relie sa courbure de rayon R et le moment fléchissant appliquée [6, 7] par l'équation :

$$y_r = \frac{1}{R} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{M}{Eb\,Ib} \qquad (9)$$

La détermination des flèches peut être faite directement par l'utilisation de la méthode des moments des aires.

2.4 Réactions dûes au retrait

Dans les structures hyperstatiques, et si les courbures dûes au retrait ne sont pas compatibles avec les liaisons d'appuis, le retrait provoque des réactions hyperstatiques au niveau de ces derniers. Le calcul de ces réactions peut être fait par la méthode des forces en remplaçant les déformations dûes aux charges extérieures par les déformations dûes au retrait et on calcule les forces équivalentes qui donne des déplacements nuls au niveau des appuis tels que [11] :

$$Vret_k + \sum_{j=1}^{n} b_{jk}\, Rret_j = 0 \qquad (10)$$

avec b_{jk} qui représente les coefficients d'influence du système étudie, Vretk les déplacements dûs au retrait au niveau des appuis et Rretj les réactions hyperstatiques causées par ces déplacements. Le calcul sera d'autant plus complexe si on considère le fluage produit par ces réactions et l'équation 10 prend la forme ci-dessous tel que φ (to,t) le coefficient du fluage correspondant. [11]

$$Vret_k + \sum_{j=1}^{n} b_{jk}\, Rret_j(to) + \int_{to}^{t} R'_{ret}\, j\, \varphi(\tau, t)\, d\tau = 0$$

3 ETUDE EXPERIMENTALE

Le but principal de cette expérimentation est d'étudier les flèches dûes au retrait pour des sections représentant une certaine dissymétrie de leurs ferraillages. Elle représente un moyen très efficace d'évaluer les effets structuraux de ce phénomène sans l'interaction du fluage. Trois types de poteaux de section rectangulaire de 15x15cm et de 2.05m de hauteur, ont été fabriqués et feraillés respectivement de 4+0, 4+1 et 4+2 barres longitudinales de T10mm, et des armatures transversales de Ø6mm équidistantes de 15 cm. On remarque, sur la figure 3, le système de fixation utilisé au niveau de la base des poteaux et les points de mesure des flèches à différents endroits de chaque poteaux [04].

Ces poteaux ont été posés verticalement, sans aucun chargement et fixés au niveaux de leurs bases afin d'empêcher tout déplacement horizontal. La seule contrainte exercée est seule dûe à leurs poids propres qui ne donne d'ailleurs qu'une déformation de l'ordre de 3μ/m lors du premier jour du chargement. Pour cela les flèches transversales mesurées ne proviennent que du seul effet du retrait.

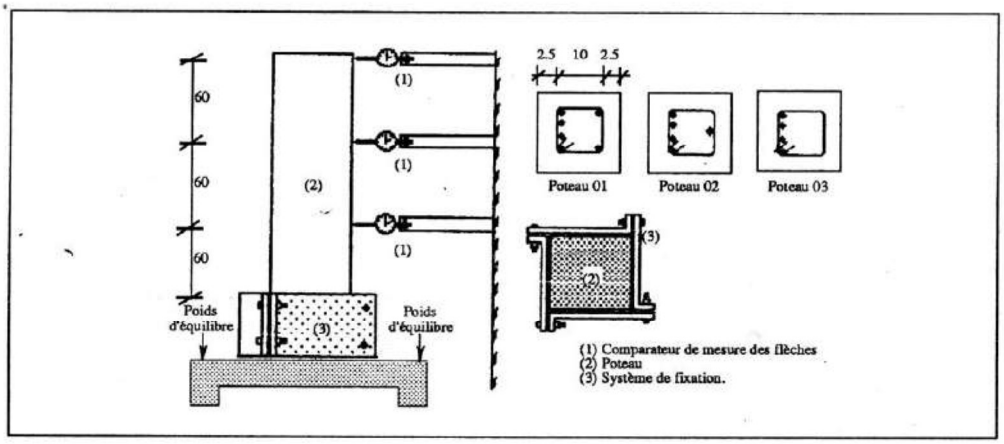


Figure 3 : Schéma de réalisation des poteaux.

Parallèlement aux essais sur les poteaux, des prélèvements sur des éprouvettes de chaque gâché ont été réalisés pendant le coulage pour le contrôle et la vérification du béton utilisé. Il s'agit des prismes cubiques de 15 cm de côté pour le contrôle de la résistance à la compression du béton, des éprouvettes cylindriques (ø = 15 cm et h = 30 cm) pour des essais de fendage pour la résistance à la traction et trois éprouvettes prismatiques de (15x15x60) cm pour la mesure du retrait ; deux pour la mesure du retrait libre et la troisième avec un ferraillage identique à celui de la structure pour évaluer le retrait produit réellement lors de la présence des aciers.

Les essais ont été effectués, au laboratoire de béton du Centre Universitaire de Chlef, sous des conditions d'humidité et de température variable suivant le cycle journalier, les essais ont commencé pendant le début d'été où les effets du fluage et du retrait se font bien sentir. Les corps d'épreuves ont été installés près d'un bac d'eau pour lutter contre la chute d'humidité pendant cette période, une mesure de température pendant la période des mesures est comprise entre 17° et 28° avec une humidité relative moyenne de 50%.

3.1 Caractéristiques du béton

La composition et les caractéristiques du béton utilisé sont présentées dans le tableau 1.

Composition du béton en kg/m³	Gravier 8/15	1065
	Sable 0/5	712
	Ciment CPA 325	350
	Eau de Gâchage	210
Caractéristiques mécaniques du béton utilisé en MPa	f_{c28}	24.4
	f_{t28}	2.8
	Eb	30 200

Tableau 1 : Caractéristiques du béton utilisé.

3.2 Evolution du retrait

Les éprouvettes témoins du retrait représentent la déformation du béton utilisé sans aucune charge appliquée. Les mesures ont été effectuées, après un jour du coulage entre deux tiges ancrées à l'intérieur du béton comme le montre la figure 4, et se sont poursuivies durant toute la période d'installation des structures.

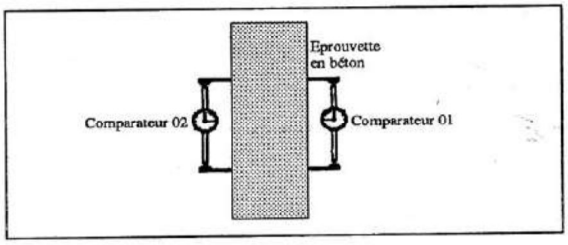


Figure 4 : Instrumentation de l'éprouvette témoin de retrait.

L'examen des résultats obtenus montre d'une façon très évidente la valeur importante du retrait, cette valeur dépasse de très loin celle donnée par le réglement BPEL 91. On constate, comme le montre la figure 5, un excès de 82% de celle du règlement.

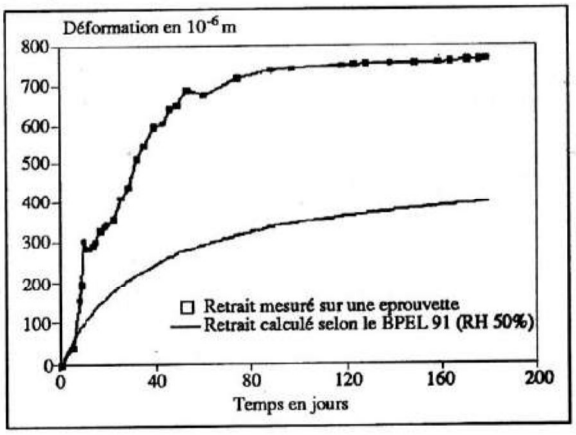


Figure 5 : Evolution de la déformation dûe au retrait.

3.3 Evolution des flèches

Les mesures effectuées sur trois points de chaque poteau situés à 60, 120 et 180 cm de la base (Figure 03) représentent l'effet direct du retrait sur les déformations des structures. Les flèches obtenues présentent une évolution dès les premiers jours en tendant vers une stabilité avec une vitesse identique à celle du retrait. Sur les figures 6, 7 et 8, on observe une variation continue des flèches dans le temps, et d'une grandeur de plus en plus importante que la disposition des armatures s'éloigne de la symétrie de la section.

La prédiction des flèches dûes au retrait est tout à fait possible en introduisant un coefficient de majoration dans le réglement BPEL 91, ceci, afin d'avoir un retrait identique à celui produit dans les mêmes conditions d'essai.

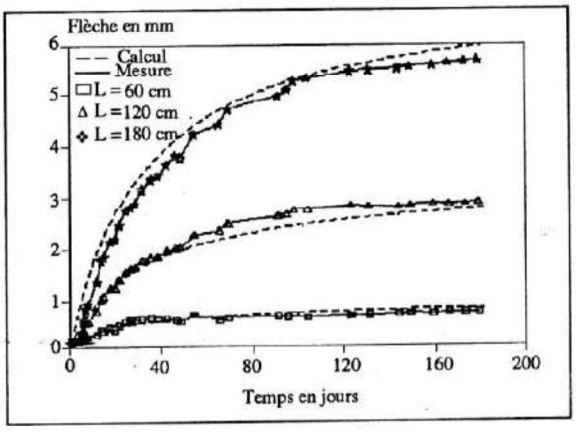


Figure 6 : Evolution des flèches dûes au retrait sur le poteau P1.

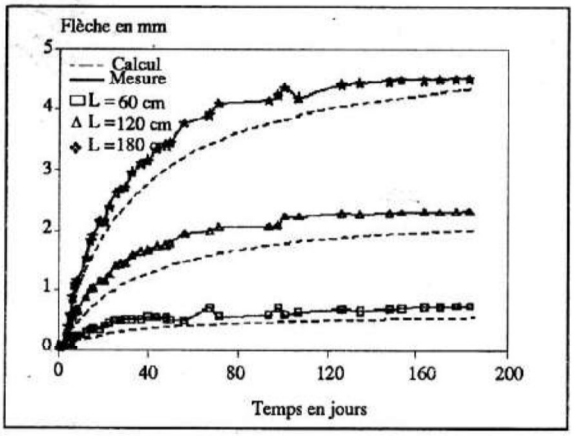


Figure 7 : Evolution des flèches dûes au retrait sur le poteau P2.

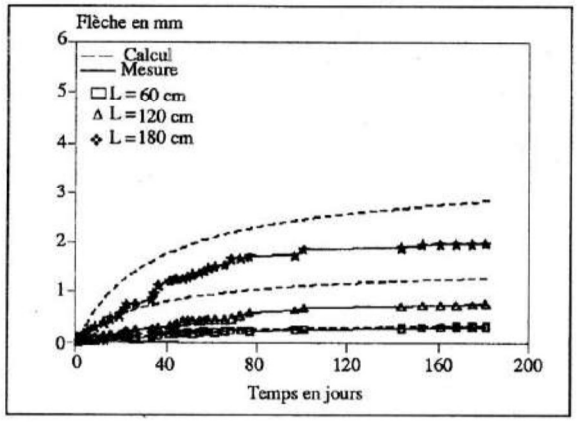


Figure 8 : Evolution des flèches dûes au retrait sur le poteau P3.

Le tableau 02 donne une comparaison très claire entre les valeurs des flèches calculées et les valeurs mesurées dûes au retrait, pour des sections avec un ferraillage dissymétrique. A l'âge de six mois l'écart entre les mesures et le calcul varie entre 0.73 et 1.54% avec valeur moyenne de 1.08.

Poteau	Ferraillage	Distance	Mesure mm	Calcul mm	Calcul / mesure
P1	4T10 + 0T10	L = 60 cm	0.56	0.66	1.17
		L = 120 cm	2.80	2.64	0.94
		L = 180 cm	5.54	5.95	1.07
P2	4T10 + 1T10	L = 60 cm	0.65	0.48	0.73
		L = 120 cm	2.22	1.90	0.85
		L = 180 cm	4.45	4.28	0.96
P3	4T10 + 2T10	L = 60 cm	0.28	0.30	1.07
		L = 120 cm	0.79	1.22	1.54
		L = 180 cm	1.93	2.74	1.42

Tableau 2 : Comparaison des résultats de mesure et de calcul des flèches dûes au retrait après six mois d'observations.

4 ESTIMATION DU RETRAIT FINAL

Des résultats de déformations des flèches dûes au retrait enregistré sur les trois poteaux isostatiques, les valeurs déduites du retrait peuvent être une voie très commode pour estimer le retrait final sous les conditions locales (régions de Chlef) pour un béton sans conservation préalable ; en prenant le modèle du BPEL 91 (Equation 1) comme référence ; et on calcule les effets finaux correspondant aux résultats obtenus. Cette méthode, initialement proposée par Brooks et Neville [12], permet de prédire les effets à long terme à partir des résultats expérimentaux à court terme.

L'analyse, des résultats permet de déterminer le modèle du retrait propre au béton utilisé, puisque la loi d'évolution des flèches est linéairement proportionnelle au modèle de retrait suivant la relation 11 avec α étant une constante :

$$\text{Flèche} = \frac{Sa\ Ea\ d\ L^2}{2\ Eb\ Ib}\ \varepsilon_r(t) + \frac{Sa\ Ea\ d\ L^2}{Eb\ Ib}\ \varepsilon_r(t) = \alpha\ \varepsilon_r(t) \quad (11)$$

Cette relation, tirée de la méthode de la force équivalente de traction, constitue un moyen très efficace d'évaluer simultanément le retrait et son influence sur les flèches. Le premier terme représente la flèche dûe au moment fléchissant causé par la non uniformité du retrait donnée par l'équation 9, le deuxième terme traduit la rotation de l'appui dûe à ce dernier moment.

Pour chaque valeur de mesures des flèches, on tire la valeur du retrait instantané, correspondante par l'équation 11. Le retrait final peut être estimé par l'équation 12 :

$$\varepsilon ro = \varepsilon r(t)\ \frac{1}{ks\left(\frac{t}{t+9\,Rm} - \frac{1}{1+9\,Rm}\right)} \quad (12)$$

La valeur du retrait final εro est prise comme étant la moyenne de 315 mesures de retrait de différents points et à différents âges du béton, ce qui correspond à un retrait final moyen de 1019 µm avec un écart type de 439µm. Le modèle représentant le retrait du béton dans les conditions d'essai se met sous la forme suivante :

$$\varepsilon r(t) = 1196\ ks\left(\frac{t}{t+9\,Rm} - \frac{1}{1+9\,Rm}\right) \quad (13)$$

Les valeurs représentées sur la figure 9 donne une corrélation entre les valeurs mesurées et celles prédites par l'équation 13. Le tableau 03 représente une comparaison quantitative de la valeur finale du retrait obtenu avec celle donnée pour des conditions hygrométriques constantes selon le BPEL 91 :

Rh %	40	50	60	70
Retrait (BPEL 91)	586	488	390	293
Retrait mesuré	1019			

Tableau 3 : Comparaison entre le retrait final mesuré et celui du BPEL 91 donné pour des conditions hygrométriques constantes.

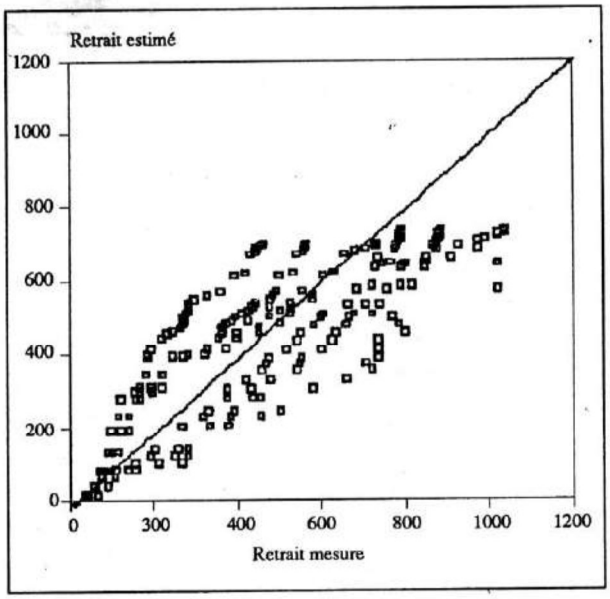


Figure 9 : Rapport entre le retrait mesuré sur les trois poteaux et le retrait estimé.

5 CONCLUSION

Cette étude expérimentale a permis une visualisation directe des effets différés de certaines structures dûes au phénomène de retrait. Les mesures effectuées donnent une certaine image sur le béton utilisé dans la région et les conditions climatiques influant sur le retrait.

Le retrait observé, durant cette expérimentation sur un béton conservé à l'air libre sous les conditions du laboratoire, semble être très important et qui peut avoir une valeur finale estimée à 1019 µm. Les flèches différées dûes uniquement au retrait croissent linéairement avec la valeur de l'excentricité des armatures par rapport à la section du béton et se stabilisent après six mois de mesures.

La disposition des armatures dans une section en béton armé peut créer avec le retrait des flèches proportionnelles à l'excentricité des armatures et qui évoluent dans le temps avec une vitesse identique à celle du modèle du retrait libre.

La prédiction des déformations de retrait est tout à fait possible en introduisant un coefficient de majoration dans le modèle du BPEL 91 afin de tenir compte mieux du béton utilisé et les conditions climatiques propres à l'Algérie.

Ce travail peut être une voie pour une étude complémentaire qui vise à définir un modèle de retrait propre à l'Algérie en tenant compte de la variation climatique, de la diversité géographique et des matériaux de construction utilisés.

BIBLIOGRAPHIE

[1] P. Acker : "*Comportement mécanique du béton & apports de l'approche physico-chimique*". Rapport de recherche LCPC n°152, 122p. Juillet 1988.

[2] R.P Johnson : "*Shrikage-Induced curvature in composite beams with a craked concrete flange*". The structural engineer, Vol 65B, n°4 p.72-77, Décembre 1987.

[3] H. Imai, K. Okada, T. Kojima & Y. Mizomato : "*Study on shrinkage craks in reinforced concrete decks slabs of highway bridges*". Transaction of japanese society of civil engineering, Vol 15 p.518-519, 1983.

[4] K. Ezziane : "*Etude théorique et expérimentale de l'influence du fluage et du retrait sur le comportement différé des structures en béton*". Thèse de magister, Institut de génie civil de chlef, 170p., Juin 1994.

[5] J. Fauchart : "*Effet du retrait et du fluage dans les ponts en béton précontraint à poutres préfabriquées rendues continues*". Symposium. "*l'influence du fluage et du retrait : l'effet des changements de la température sur les constructions en béton*". p.7 Madrid 1970.

[6] J.A Sbarounis : "*Effet of construction loads on long-term deflections*". Concrete international p.62-69, April 1984.

[7] K.S Stephen Tam & A. Scanlon : "*Deflection of two-way subjected to restrained volume change and transverse loads*". ACI Journal, Vol 83, n°5, p.737-744, Septembre-Octobre 1986.

[8] V.A Pulmano & Y.S Shin : "*Simplified finite-element analysis of deflections of reinforced concrete beams*". ACI-Structural Journal, Vol 84, n°4, p. 342-348, Jul-Aug 1987.

[9] BPEL 91 : "*Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites*". 110p. Avril 1992.

[10] D.E Branson : "*Déformation of concrete structures*". McGraw-Hill, 546p. New York, 1977.

[11] J. Courbon : "*Influence du fluage linéaire sur l'équilibre des systèmes hyperstatiques en béton précontraint*". Annales de l'ITBTP n°455, p.327-353, Fev. 1968.

[12] J. Brooks & A.M : "*Estimation long-term creep and shrinkage from short-term Tests*". Magazine of concrete research, Vol 27, n°90, P. 3-12, Mars 1975.