

EFFETS STRUCTURAUX DU FLUAGE DANS LES STRUCTURES EN BETON ARME

K. EZZIANE

Maître Assistant, Centre Universitaire de Chlef

A. HALLAL

Assistant, Centre Universitaire de Chlef

A. BOUIKNI

Chargé de cours, Centre Universitaire de Chlef

Résumé :

Une étude expérimentale a été entamée au centre universitaire de chlef afin de mieux comprendre et quantifier les effets du fluage sur certaines structures. Leur conception a été prise selon le matériel disponible et les instruments existants au niveau du laboratoire. Deux poutres avec une charge uniformément répartie ont été instrumentées, l'une isostatique pour suivre l'évolution des flèches et des déformation du béton, l'autre subit aussitôt après le chargement un blocage de la flèche à mi-portée et devient hyperstatique afin de suivre la redistribution des réactions d'appuis due au fluage.

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

1 INTRODUCTION

Pour mieux visualiser le phénomène de fluage, on porte brusquement la charge de compression sur une éprouvette en béton à une valeur non nulle ; on constate alors que la déformation augmente brusquement au temps t_0 , mais ensuite, elle continue d'augmenter avec une vitesse de déformation qui diminue au fur et à mesure que le temps s'écoule : on a ce qu'on appelle le phénomène de la viscoélasticité du béton "fluage". Le comportement du béton est donc intermédiaire entre le comportement purement élastique (ou le fluage est nul), et le comportement purement visqueux (ou il se ferait à vitesse constante) [1], sur la figure 1 une éprouvette en béton se déforme au cours du temps sans charge à cause du retrait et avec charge à cause du fluage.

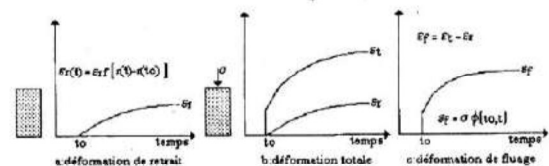


Figure 1 : Evolution des déformations différées du béton

2 DEFORMATION DU FLUAGE

On définit le fluage d'un élément de béton sous une contrainte " σ " maintenue constante dans le temps comme la différence entre les déformations différées de deux éprouvettes l'une chargée par la contrainte " σ " et l'autre sans charge [2]. Généralement cette déformation différée est donnée par la loi de Hooke en remplaçant le module de déformation instantané " E_b " par le module différé $E_b(t_0, t)$ tel que :

$$E_b(t_0, t) = \frac{E_b(t_0)}{1 + \varphi(t_0, t)} \quad (1)$$

La fonction $\varphi(t_0, t)$, appelé coefficient de fluage est une fonction croissante du temps d'observation " t " lorsque l'âge d'application " t_0 " de la charge " σ " est fixe et une fonction décroissante de l'âge d'application " t_0 " de la charge " σ " pour un temps d'observation " t " fixe. Ce coefficient qui caractérise la vitesse et l'amplitude de ce phénomène dépend des caractéristiques du béton tel que le dosage en ciment, le dosage en E/C, la quantité des granulats, leurs qualités, la taille de l'élément considéré ainsi que des paramètres définissant les conditions de conservation telle que la température et l'humidité relative [3].

3 EFFETS STRUCTURAUX DUS AU FLUAGE

Le fluage du béton demeure parmi les phénomènes majeurs qui occupent les chercheurs, ses effets sur les structures restent toujours le sujet principal à recourir de la plus part des désordres observés lors de l'exploitation des ouvrages. Sa prise en compte dans le calcul s'avère indispensable dont toute négligence peut conduire à des flèches inadmissibles, une redistribution des efforts incompatibles avec les liaisons de la structure ou des pertes de précontrainte qui peuvent rendre la structure très fragile [4]. A nos jours, des études de plus en plus poussées sont entamées et des méthodes de calcul sont élaborées afin de lutter contre toute détérioration imprévue qui risque d'apparaître dans les ouvrages.

3.1 Effet du fluage dans les éléments comprimés

La présence des armatures dans une section comprimée entrave, comme pour le retrait, l'évolution libre du fluage, ce dernier sera autant plus réduit que le pourcentage des armatures est important. Le fluage empêché du béton armé engendre une croissance de la contrainte des armatures σ_a et une diminution de la contrainte du béton σ_b . En tenant compte de cet effet, il sera facile de déduire la déformation du fluage empêché par les armatures à partir d'un fluage libre en supposant que le fluage produit est proportionnel au rapport de la section nette du béton et celle de la section homogénéisée. D'où on introduit dans le calcul un coefficient k_s qui tient compte de la présence des armatures et leurs effets sur l'évolution du fluage [5].

$$\frac{\text{fluage du béton armé}}{\text{fluage du béton non armé}} = k_s = \frac{1}{1+n\mu_s} \quad (2)$$

3.2 Effet du fluage dans les éléments fléchis

Dans une section en béton armé, fléchi, soumise à un moment fléchissant constant, l'état de déformation évolue dans le temps et une importante variation des caractéristiques de la section apparaît, d'où résultent :

- Une augmentation importante du raccourcissement du béton ;
- Un abaissement de l'axe neutre ;
- Une diminution du bras de levier "z", et donc une augmentation de la concentration de la contrainte de l'acier tendu.

L'expérience montre en effet que la déformation différée est importante et la flèche totale peut atteindre environ deux ou trois fois la flèche instantanée. Souvent les règles affectent l'inertie de la section d'un coefficient différent suivant que les charges soient permanentes ou de faible durée d'application. La flèche totale peut être évaluée dans les éléments non fissurés comme suit [4] :

$$f_t(\text{flèche totale}) = f_0(\text{flèche instantanée}) + f_d(\text{flèche différée}) \quad (3)$$

$$f_t = f_0(1 + \varphi(t_0, t))$$

3.3 Effet du fluage dans les éléments en béton précontraint

Dans une structure en béton précontraint les sections sont affectées par le fluage, ceci engendre des déformations non compatibles avec la mise en tension des armatures ce qui provoque une chute de tension de la précontrainte et un nouvel état de sollicitation dans la section. Si la structure est hyperstatique avec une précontrainte non concordante ; un nouvel équilibre des forces se produit entre les réactions d'appuis et les nouvelles sollicitations causées par la perte de précontrainte [6,7]. Dans une structure isostatique la perte de précontrainte due au fluage "dN" ainsi que la chute dans le moment fléchissant correspondant "dM" sont données par :

$$\begin{pmatrix} dN \\ dM \end{pmatrix}_{\text{fluage}} = -Eb(t)\varphi(t_0, t) \begin{pmatrix} S_b & S_{sb} \\ S_{sb} & I_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_0 \\ \gamma_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

avec :

- S_b : l'aire de la section du béton,
- S_{sb} : moment statique de la section béton,
- I_b : moment d'inertie de la section,
- ϵ_0 : déformation initiale au niveau du câble d'armature,
- γ_0 : courbure initiale de la section,
- E_b : module de déformation du béton,

3.4 Effets du fluage dans les structures hyperstatiques

Dans les structures hyperstatiques où le schéma statique est maintenu le même avant et après le chargement, le fluage du béton n'a aucun effet sur l'équilibre des forces. Donc, dans l'hypothèse du fluage linéaire, l'équilibre d'un système hyperstatique, sous l'influence des forces extérieures données constantes dans le temps, est indépendant du temps et identique à l'équilibre élastique correspondant à un module de déformation constant.

Souvent dans la pratique, on impose aux structures des déformations en certains points et qu'on les rend maintenues par des liaisons surabondantes. Si on applique à une structure aux points B_k des déplacements fixes $\mathcal{U}_k$, on remarque que des réactions hyperstatiques $R_k(t)$, appelées réactions compensatrices apparaissent au niveau de ces appuis et qui sont des fonctions du temps. Au temps t_0 , les valeurs initiales $R_j(t_0)$ des réactions compensatrices sont données par le système d'équations linéaires [8]

$$\int_{t_0}^t \frac{1}{E_b(\tau, t)} R_j'(\tau) d\tau = \frac{-\varphi(t_0, t)}{Eb(t_0, t_0)} R_j(t_0) \quad (5)$$

Si dans une structure quelconque on bloque la libre évolution des déformations différées causées

par le fluage du béton, des réactions supplémentaires apparaissent au niveau de ces points et qui progressent dans le temps, ceci revient à introduire dans la structure des liaisons supplémentaires et rendre le système n fois hyperstatiques, $n+p$ fois hyperstatiques, tel que p est le nombre des points bloqués. On désigne par $R^*(t_0)$ les réactions hyperstatiques calculées en supposant l'ouvrage construit selon le schéma statique final, les déplacements des points d'appuis au temps t_0 , avant la réalisation des liaisons surabondantes valent [9]:

$$\int_{t_0}^t \frac{R_j(\tau) d\tau}{E_b(\tau, t)} = \frac{\varphi(t_0, t)}{E_b(t_0, t_0)} R_j^*(t_0) \quad (6)$$

4 ETUDE EXPERIMENTALE

Cette étude expérimentale [10] présente certains essais représentant le phénomène du fluage du béton et son influence sur les structures en béton armé. Leurs conception a été prise afin de visualiser les effets de ce phénomène sur l'évolution des flèches dans une structure isostatique et la distribution des réactions d'appuis dans une structure iso-hyperstatique.

4.1 Présentation des essais

Cette étude consiste à réaliser une poutre de section rectangulaire, soumise à une charge uniformément répartie de 134 kg/m après 28 jours de son coulage (figure 2). La poutre a été instrumentée afin de suivre l'évolution des flèches et de certaines déformations sur trois sections différentes : A, B et C. Sur une poutre similaire à celle du premier essai et sous les mêmes conditions de chargement, on a procédé après avoir distribuer la charge et avoir accompli sa déformation instantanée à un blocage de la flèche au milieu de la travée, ceci conduit à un changement du schéma statique, et la structure devient hyperstatique. Un dynamomètre placé sous la poutre permet de mesurer la réaction qui assure ce blocage, et un vérin manuel est utilisé afin d'ajuster la flèche à sa valeur constante. Sur la figure 3 sont représentés les instruments de mesure ainsi que les différents points de mesure.

Parallèlement aux essais sur les structures, des prélèvements sur des éprouvettes de chaque gâché ont été réalisés pendant le coulage pour le contrôle et la vérification du béton utilisé. Pour la mesure du retrait on a utilisé des éprouvettes prismatiques de 15x15x60 cm³, pour chaque structure on prélève trois éprouvettes; deux pour la mesure du retrait libre et la troisième avec un ferrailage identique à celui de la structure pour évaluer le retrait produit réellement lors de la présence des aciers [11].

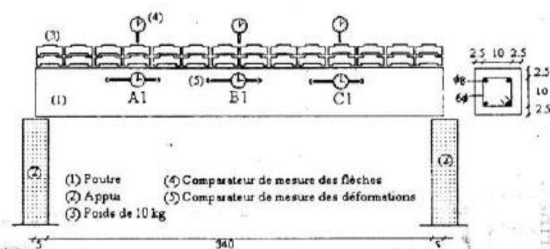


Figure 2 : Schéma de la réalisation de la poutre isostatique

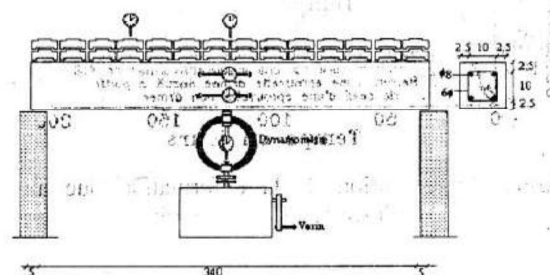


Figure 3 : Schéma de la réalisation de la poutre iso-hyperstatique

4.2 Caractéristiques du béton

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

Composition du béton En kg/m ³	Gravier 8/15	1065
	Sable 0/5	712
	Ciment CPA325	350
	Eau de Gâchage	210
Caractéristiques mécaniques du béton utilisé en MPa	F _{c28}	24.4
	F _{t28}	2.8
	E _b	30 200

Tableau 1 : Caractéristiques du béton utilisé.

4.3 Présentation des résultats

4.3.1 Prismes témoins de retrait

Les prismes témoins du retrait représentent la déformation du béton utilisé sans aucune charge. La mesure est effectuée, après un jour du coulage entre deux tiges ancrées à l'intérieur du béton, et se sont poursuivies durant toute la période d'installation des structures. La comparaison des retraits de deux éprouvettes prismatiques confectionnées avec le même béton, l'une armée de 4T8 et l'autre en béton seul, donne une variation de 17 % tandis que le règlement BPEL donne une variation de 27 %. Cet écart n'est plus étonnant puisque la mesure ne donne que la valeur du retrait à l'endroit de la mesure et le règlement donne la valeur moyenne sur la section. Sur la figure 4, l'évolution des deux retraits est pratiquement identique dans les premiers jours après le coulage et elle ne diffère qu'après les deux premières semaines où le béton commence à avoir sa propre résistance.

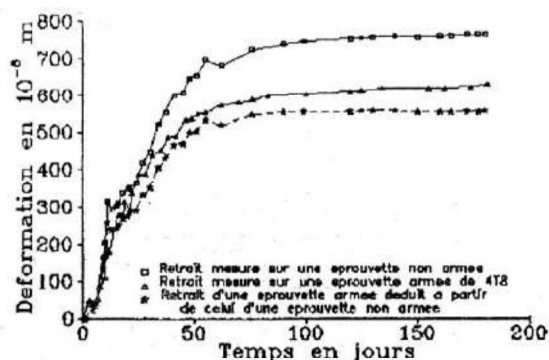


Figure 4 : Evolution de la déformation due au retrait sur les prisme témoins

4.3.2 Evolution des déformations

Pour mener bien l'étude des phénomènes différés du béton, il est intéressant de suivre l'évolution des déformations sur les sections A1, B1 et C1 situées à 4cm de l'axe de symétrie de la poutre isostatique. La mesure directe donne une superposition de la déformation due au retrait et celle due au fluage, en éliminant la déformation de retrait enregistrée sur le prisme témoin on obtient la déformation du fluage sous une contrainte constante correspondante à la contrainte exercée au niveau de cette fibre sans l'interférence du retrait, les figures 5,6 et 7 montrent les résultats de mesure et le fluage déduit de la déformation totale.

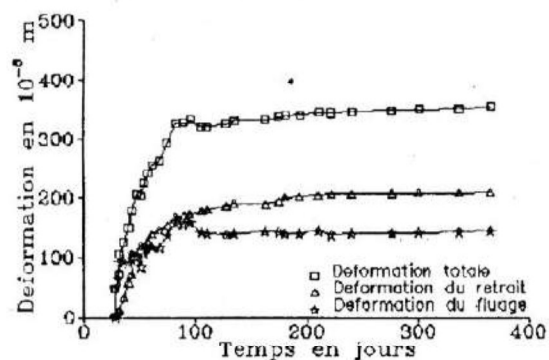


Figure 5 : Evolution de la déformation de la section A1 de la poutre isostatique

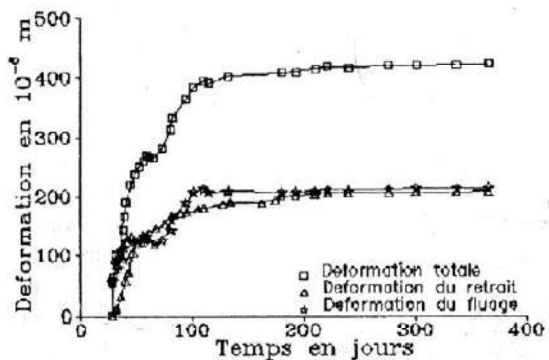


Figure 6 : Evolution de la déformation de la section B1 de la poutre isostatique.

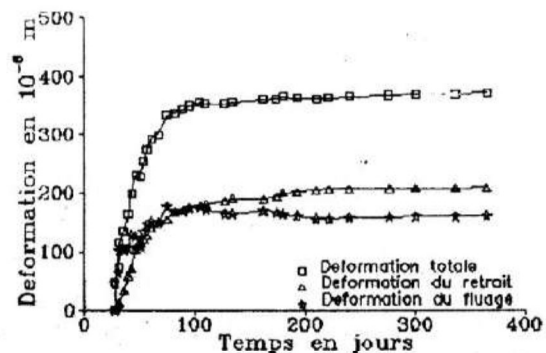


Figure 7 : Evolution de la déformation de la section C1 de la poutre isostatique.

Afin d'avoir une bonne estimation des modèles de fluage du béton utilisé dans cette série d'expérimentation on a essayé de faire un traitement des résultats obtenus et en déduire les valeurs finales de ce phénomène. Cette méthode, proposée par Brooks et Neville [12], permet de prédire les effets à long terme à partir des résultats expérimentaux à court terme. Sur les trois fibres étudiées avec 30 mesures chacune étalées sur une année d'observation on a pu trouver une valeur moyenne du coefficient de fluage à long terme de l'ordre de 4.56 avec un écart type de 0.73 ce qui donne un pourcentage de l'erreur évalué à 22 % (figure 8).

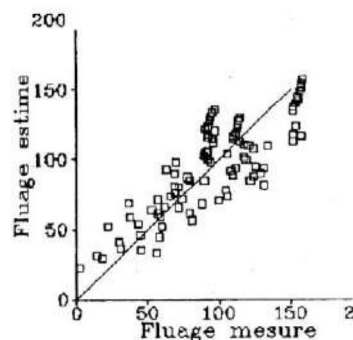


Figure 8 : Rapport du fluage mesuré et calculé sur la poutre isostatique

Ainsi on peut prédire approximativement le fluage dans les conditions du laboratoire pour un béton chargé à 28 jours en utilisant le modèle du BPEL 91 avec une correction de 37 % afin de tenir compte mieux des conditions climatiques et des propriétés du béton utilisé. sur le tableau 2, on compare les résultats trouvés avec ceux du BPEL 91 pour différentes humidités relatives.

Rh%	40	50	60	70
$K_{\text{fl BPFL}}$	3.80	3.32	2.84	2.36
$K_{\text{fl mesuré}}$	4.56			
$k_{\text{fl}}(\text{BPEL})$	1.20	1.37	1.60	1.93
$k_{\text{fl}}(\text{mesuré})$				

Tableau 2 : Comparaison entre le fluage final mesuré et celui du BPEL donné pour des conditions hygro-métriques constantes.

4.3.4 Evolution des flèches.

Dans l'essai d'une poutre isostatique soumise à une charge constante, les flèches constituent sans aucun doute un moyen très efficace d'évaluer l'effet du fluage sur le comportement différé des structures, d'estimer sa vitesse, de prédire sa stabilité, de valoriser le modèle du fluage correspondant. Malgré la courte durée d'observation qui est loin d'être en mesure de prédire ce phénomène, on a essayé de quantifier le taux de fluage acquis durant l'année d'observation par rapport à la valeur finale. Le taux de fluage acquis, dans ce cas, représente le rapport entre la flèche différée à l'instant t sur la flèche différée finale (après une année), on représente sur le tableau 3, les résultats mesures sur les trois sections ainsi qu'une comparaison avec le BPEL 91 [5]. On constate un taux d'accroissement sensiblement identique avec le BPEL, avec une valeur inférieure pendant les cinq premiers mois et une récupération après 150 jours, ceci peut traduire par la non uniformité des conditions climatiques durant cette période d'observation (Figure 9).

Flèche	Age en jours	28	60	120	180	240	365
Flèche (mm)	mesure	1.52	2.78	3.42	4.18	4.29	4.35
	BPEL 91	1.13	2.67	3.14	3.35	3.48	3.66
FlècheB (mm)	mesure	1.31	2.21	2.46	2.81	2.95	3.10
	BPEL 91	1.59	3.75	4.41	4.7	4.88	5.13
FlècheC (mm)	Msure	1.07	2.05	2.28	2.71	2.88	2.94
	BPEL 91	1.13	2.67	3.14	3.35	3.48	3.66
Taux de fluage	Mesure	0	49	65	89	96	100
	BPEL 91	0	56	75	85	92	100

Tableau 3 : Valeurs des flèches mesurées et calculées sur la poutre isostatique.

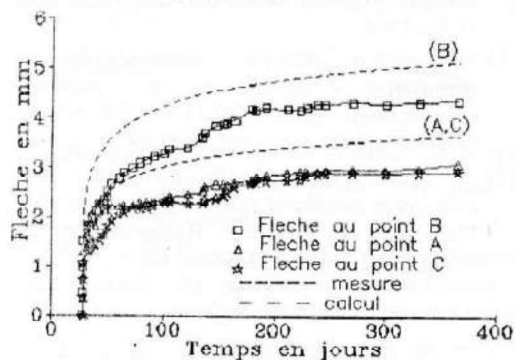


Figure 9 : Evolution des Flèches enregistrées sur la poutre isostatique.

4.3.5 Evolution des Réactions d'Appui

Sur une poutre similaire à la poutre isostatique, représentée sur la figure 3, et aussitôt après son chargement, on introduit un appui supplémentaire de telle façon qu'en bloque toute déformation ultérieure à mi-portée. La réaction mesurée qui résulte sur cette appui, initialement nulle, croît en fonction du temps avec une vitesse supérieure à celle du fluage, phénomène bien connu sous le nom de relaxation, pour se stabiliser autour d'une valeur de 2.08 kN après une année de chargement permanent (Figure 10).

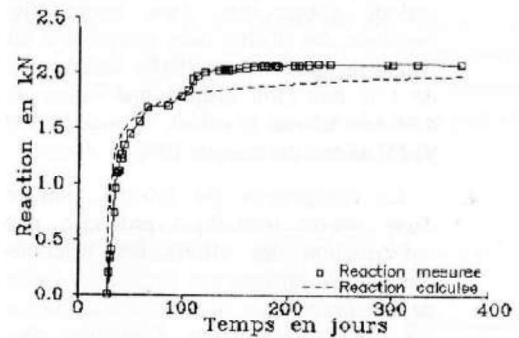


Figure 10 : Evolution de la réaction hyperstatique sur l'appui central de la poutre.

Sur le tableau 4, on présente les pourcentages de la réaction acquis en fonction du temps, ce qui permet d'apercevoir de manière quantitative l'évolution de cette réaction et de déduire la vitesse de relaxation du béton.

Du tableau 4, il est très évident de déduire la vitesse de relaxation du béton, tel qu'on obtient plus de 60 % de la réaction d'une année après un mois du blocage de la déformation, et plus de 80 % après quatre mois, ceci montre que la relaxation est un phénomène rapide qui s'achève rapidement, la comparaison de sa vitesse avec celle du fluage mesuré s'avère très supérieure puisque elle atteint les 99 % de sa valeur en six mois seulement tandis qu'il faut une année au fluage pour s'accomplir.

	Age en Jours	28	60	120	180	240	365
Réaction	mesure	0	1.39	2.01	2.07	2.08	2.08
	BPEL 91	0	1.56	2.01	2.06	2.08	2.08
En kN	BPEL 91	0.0	67	96	99	100	100
% Taux de Relaxation	calcul	0.00	84	93	94	97	100

Tableau 4 : Vitesse d'évolution de la réaction de l'appui central de la poutre.

5 CONCLUSION

Cette étude expérimentale a permis de constater directement les effets du fluage sur le comportement différé des structures en béton. Ainsi on a remarqué que le fluage produit, dans les conditions du laboratoire, est de 37 % supérieur que celui donné par le BPEL 91, cette valeur sera réduite considérablement Si les essais étaient en hiver. La vitesse de ce phénomène est pratiquement la même que celle du règlement avec une petite fluctuation au début de chaque essai.

- Une poutre isostatique avec un ferrailage symétrique donne, durant une période d'observation d'une année, une évolution des flèches dues uniquement au fluage du béton. Cette flèche initialement de 1.51 mm croît jusqu'à une valeur de 4.35 mm tel que le calcul, selon le BPEL 91 [5], donne un écart de 10%.
- Le changement du schéma statique d'une poutre isostatique provoque une redistribution des efforts des réactions d'appuis, ce changement caractérise l'effet de la relaxation du béton et son influence sur cette redistribution. L'addition d'un appui central crée une augmentation de la réaction au niveau de cet appui qui croît d'une valeur nulle jusqu'à une valeur de 2.08 kN pendant une année d'observation, avec un écart de 5 % par rapport aux résultats de calcul selon l'équation 6 [9].
- Le coefficient du fluage final trouvé pour le béton utilisé dans les conditions de réalisation est de l'ordre de 4.56. Cette valeur importante donne un excès de 37 % par rapport à un essai de fluage dans des conditions constantes de 50 % d'humidité relative.
- La vitesse du fluage observé est presque identique à celle donnée par le BPEL (écart de 3.8%).
- Une très grande vitesse de relaxation du béton, tel qu'on obtient 60 % de la relaxation d'une année en un mois et 80 % en quatre mois. Cette vitesse est 10 % moins que celle du règlement (BPEL) durant les deux premiers mois du chargement et 4 % plus importante après.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. Nowacki, Théorie du fluage, Edition Eyrolles, 1965,
- [2] P. Acker, *Comportement mécanique du béton: Apports de l'Approche physico-chimique*, Rapport de recherche LPC, N°: 152, 122 p, Juillet 1988.
- [3] C. Huet, P. Acker et J. Baron, *Fluage et autres effets rhéologiques différés du béton*, in , *Le béton Hydraulique: connaissance et pratique*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p:335-364, 1982.
- [4] M. Y. Lau, *Calcul des effets structuraux*, Annales de l'I.T.B.T.P, N°:455, série béton, p:98-117, Juin 1987.
- [5] BPEL 91, *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites*, 152p , Avril 1992.
- [6] J. Bruneau, *Etude théorique de la redistribution des effets hyperstatiques des ponts en béton précontraint par fluage linéaire*, BuL liai. des PC, N°:96, p:281-301, Juillet-Aout 1978.
- [7] M.M. Fauchart, Karvyrchine, Nung, *Essais sur la redistribution des efforts dans les structures hyperstatiques en béton précontraint sous l'effet du fluage du béton*, Cahiers du groupe français de rhéologie, tome 3, N°:5, France, p:211-223, Avril 1975.
- [8] J. Courbon, *Influence du fluage linéaire sur l'équilibre des systèmes hyperstatiques en béton précontraint*, Annales de l'I.T.B.T.P, N°:455, p:327-353 , Fev 1968
- [9] G. Glienna, L. Dezi, A. Marcello, *Method for analyzing complex viscoelastic structures*, Journal of Engineering Mechanics, Vol 121, N°2, p: 187-197, FEV 1995.
- [10] 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, centre universitaire de Clef, 153p, 1994.
- [11] G. Coquillat, *Mesure fondamentales sur éprouvettes: définition et méthodes expérimentales*, Annales de l'I.T.B.T.P, N°:455, Série béton 248, Juin 1987, p:82-88.
- [12] J.J. Brooks, A.M. Neville, *Estimation long-term creep and shrinkage from short-term tests*, Magazine of Concrete Research, Vol:27, N°:90, p:3-12, Mar 1975.