

Quatorzième édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Sherbrooke, Québec, Canada
22-23 août 2013

FISSURATION ET COMPORTEMENT DIFFÉRÉ DES BÉTONS: ÉTUDES ET RÉSULTATS RÉCENTS DE L'IFSTTAR

P. Rossi, J.L. Tailhan, F. Le Maou, C. Boulay
Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux,
Université Paris-Est, France

RÉSUMÉ : Les gestionnaires d'ouvrages ont besoin d'une meilleure évaluation et d'une prédiction plus pertinente de la rupture différée de ces ouvrages. Pour des structures stratégiques comme les enceintes des centrales nucléaires, les sollicitations mécaniques peuvent être maintenues à un niveau élevé (supérieur à 75% de la capacité de la structure vis-à-vis de la sollicitation), et peuvent conduire à la rupture de l'ouvrage après un certain temps. Dans cette étude, une série d'essais de flexion 4 points a été réalisée afin de caractériser le comportement au fluage de poutres pré-fissurées soumises à des niveaux de charge élevés. Une relation en loi puissance est observée entre la vitesse de fluage en flexion et le temps à la rupture des éprouvettes. Il est également montré que lorsque la propagation de la fissure se produit, la vitesse de fluage en flexion augmente avec le niveau de chargement et la vitesse de propagation de la fissure.

1. INTRODUCTION

La rupture dans le temps des structures en béton sous charge permanente est depuis longtemps un problème important pour les gestionnaires d'ouvrage et pour les chercheurs. Ainsi, par exemple, la propagation d'une microfissure au sein d'une structure soumise à des charges soutenues nécessite d'être mieux comprise et analysée.

Par le passé, certains chercheurs ont travaillé sur l'interaction entre la propagation des fissures et le comportement différé des bétons (Rüsch, 1960, Smadi et al., 1985, Rossi, 1989, Rossi et Boulay, 1990, Bazant et Gettu 1992, Zhou, 1992, Carpinteri et al., 1997, Denarié, 2000, Mazzotti et Savoia, 2002, Denarié et al., 2006, Omar et al., 2009).

L'objectif scientifique du présent travail est de comprendre les mécanismes physiques impliqués dans le couplage possible entre la propagation des fissures et comportement différé du béton.

L'objectif industriel concerne principalement le cas de l'enceinte de confinement d'une centrale nucléaire.

En effet, dans le génie civil nucléaire, les exigences de sécurité portent sur la durabilité et la pérennité des fonctionnalités des enceintes de confinement en termes de stabilité et de confinement. Cette exigence est très différente des fonctionnalités classiques dans les bâtiments et peut être difficile à obtenir.

Pour faire fonctionner les centrales nucléaires (NPP), EDF (l'opérateur français) doit justifier, à l'autorité de sûreté française, la capacité qu'a l'enceinte de confinement d'assurer, en cas d'accident, un taux de fuite inférieur à 1,5% par jour de la masse totale des fluides. Pour évaluer ce taux de fuite possible chaque structure de confinement subit tous les 10 ans un test d'étanchéité sous une pression de 0,53 MPa dans de l'air sec et à température atmosphérique (la durée de ce test de fuite est d'environ 3 jours). Dans ce cas, le taux de fuite ne doit pas dépasser 1% (au total). Si ce n'est pas le cas, les réparations sont nécessaires pour améliorer l'étanchéité de l'enceinte de confinement. Bien sûr, ces réparations dans un contexte nucléaire sont très chères. De plus, si la centrale nucléaire n'est pas autorisée à fonctionner, les pertes deviennent très importantes (environ 1 M € par jour).

Lors de ce test de fuite, des fissures existantes dans la structure peuvent se propager. Il est donc très important d'évaluer l'évolution de cette fissuration.

Pour ce faire, une étude expérimentale portant sur la propagation d'une fissure dans une poutrelle soumise à une sollicitation de fluage en flexion a été réalisée, étude qui fait l'objet du présent article.

2. BETON ETUDIE

Afin d'évaluer les caractéristiques mécaniques de base (résistance à la compression et à la traction) du béton étudié, des essais de traction uniaxiale et des essais de compression ont été réalisés. Les essais de compression ont été effectués à des âges différents, 7, 14, 28, 64, 90, 180 jours afin d'étudier l'évolution de la résistance du béton. Pour les essais de traction uniaxiale, une seule échéance à 64 jours a été prise en compte. Six éprouvettes par âge du béton ont été testées à la fois pour les essais de traction et de compression. Le tableau 1 résume les résultats obtenus.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques du béton

Caractéristiques mécaniques (MPa)		Compression					Traction
Age du béton (jours)	7	14	28	64	90	180	64
Valeur moyenne (MPa)	31.2	35.1	39.9	42.2	44.4	51.2	2.8

3. MATERIEL ET MODE OPERATOIRE RELATIFS AUX ESSAIS

Cette étude expérimentale met l'accent sur des essais de flexion 4 points sur des éprouvettes prismatiques de dimension: 200 mm de hauteur, 150 mm de largeur et 700 mm de longueur. Vingt-quatre heures après le coulage, les éprouvettes sont démoulées et protégées du séchage par deux couches d'aluminium auto-adhésif. Elles sont ensuite stockées dans une pièce à température et humidité contrôlées. L'espacement entre les 4 points de la sollicitation est de 200 mm. Une machine d'essai hydraulique de 100 kN a été utilisée pour réaliser la sollicitation. Cette machine et le banc de flexion ont été également utilisés pour pré-fissurer les éprouvettes et les caractériser en flexion statique. Les éprouvettes sont instrumentées (LVDT) de telle manière à en déterminer la flèche au centre. L'appareil de mesure est fixé en deux points de l'éprouvette afin d'éviter des déplacements parasites quant à la mesure de la flèche (figure 1). Un autre système de mesure (LVDT) est utilisé pour évaluer le déplacement horizontal (déplacement parallèle à la longueur de l'éprouvette) à 25 mm de la fibre inférieure de l'éprouvette (figure 1). La base de mesure de ce déplacement horizontal, appelé dans ce travail D25, est de 200 mm.



Figure 1. Montage d'essai pour le pliage essai de fluage sur éprouvettes fissurées

En ce qui concerne l'essai statique pour la caractérisation des éprouvettes en flexion, six éprouvettes ont été testées. L'âge du béton lorsque ces éprouvettes sont sollicitées est de 28 jours. En ce qui concerne l'étape liée à la pré-fissuration des éprouvettes, la stratégie adoptée est la suivante:

- A partir de la courbe moyenne effort-flèche, obtenue lors des essais statiques, une valeur de flèche en relation avec le comportement post-pic de l'éprouvette est retenue. Cette valeur est appelée δ_0 . Elle correspond à une certaine longueur de propagation de la fissure et une certaine valeur de l'effort, appelé P_0 .
- Ainsi, pour les éprouvettes sollicitées en fluage, la première étape consiste en un chargement statique jusqu'à une flèche égale à δ_0 .

Après avoir créé la fissure initiale, l'éprouvette est déchargée. Elle est ensuite rechargée jusqu'à une force correspondant à un pourcentage de P_0 . Cette force est appelée P_S (figure 2). C'est cette force qui

constitue la sollicitation de fluage. La durée maximale de la sollicitation de fluage sur cette machine ne dépasse pas les 3 jours. L'essai est arrêté après ces 3 jours.

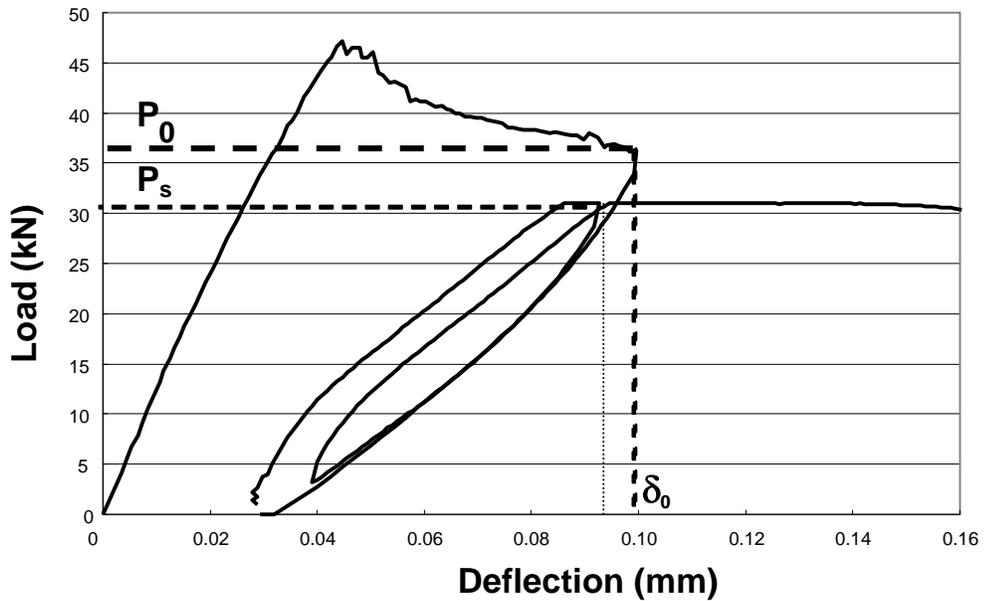


Figure 2. Courbe Effort-Flèche – Procédure adoptée pour définir la sollicitation de fluage

Pendant la sollicitation de fluage, des cycles de *déchargement/rechargement* sont effectués pour suivre l'évolution de la complaisance de l'éprouvette (Figure 3). L'objectif de cette procédure est de détecter une éventuelle propagation de la fissure au cours du fluage.

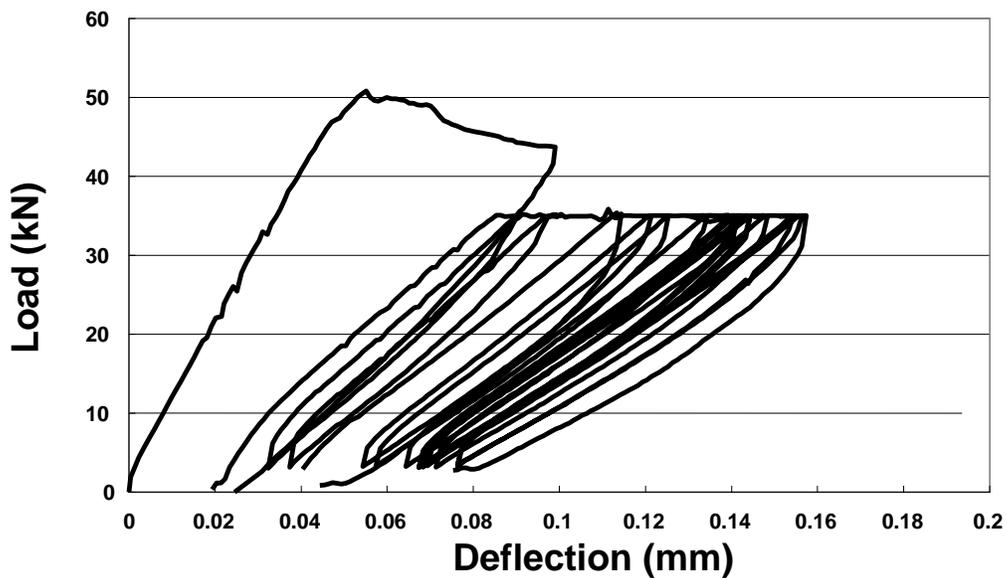


Figure 3. Exemple de cycles de *déchargement/rechargement* effectués lors de la sollicitation de fluage

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

La figure 4 présente la relation (en échelle log-log) entre le temps à rupture et la vitesse de fluage secondaire en flexion. Cette vitesse de fluage secondaire en flexion (flèche) n'est pas accessible pour tous les essais (voir tableau 2) en raison de problèmes avec la mesure de la flèche.

Le tableau 2 présente tous les résultats relatifs aux essais.

La figure 5 présente les courbes relatives à l'évolution de la complaisance dans le temps. L'évolution de cette complaisance est égale à $C(t) - C_s$ où $C(t)$ est la complaisance de l'éprouvette à l'instant t durant la sollicitation de fluage et C_s est la complaisance de l'éprouvette avant la sollicitation de fluage.

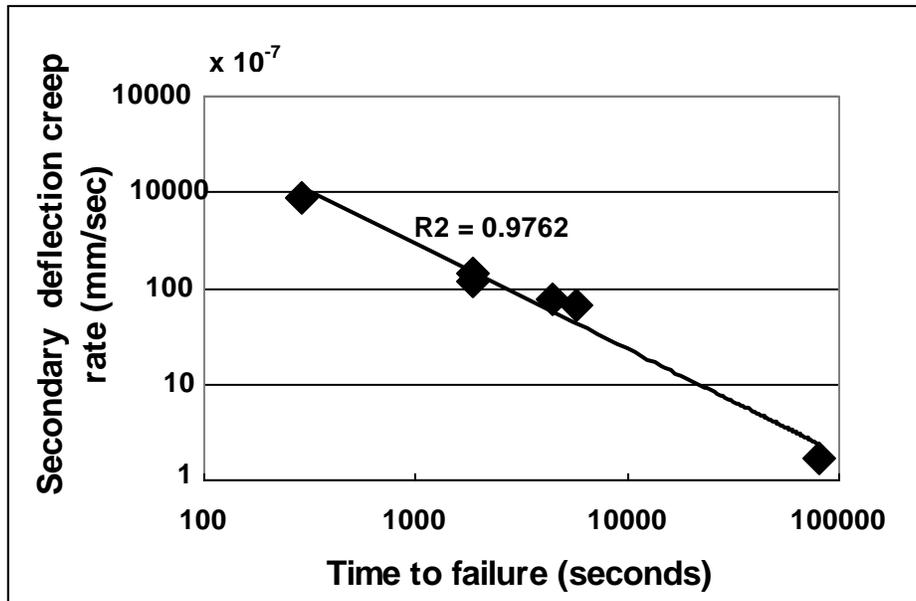


Figure 4. Vitesse de fluage secondaire en flexion versus temps à la rupture

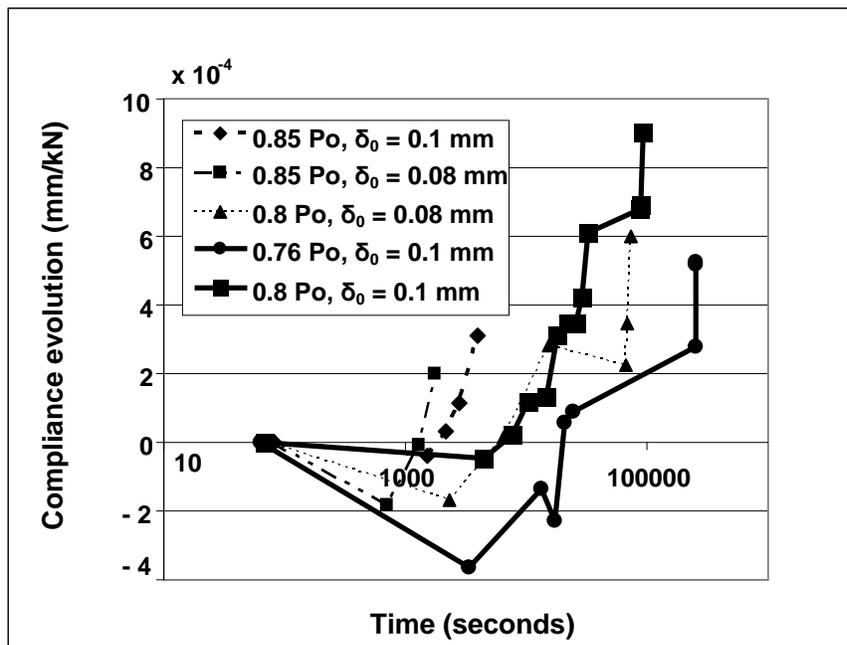


Figure 5. Evolution de la complaisance en fonction du temps

Tableau 2. Tous les essais de fluage en flexion - Différents résultats

Age du béton (jours)	P_s/P_0	δ_0 (mm)	Temps à rupture (Seconds)	Cycles O/N- Nombre	Vitesse de fluage de la flèche ($\times 10^{-7}$ mm/s)	Vitesse de fluage du déplacement (D25) ($\times 10^{-7}$ mm/s)
60	0,80	0,1	Arrêt de l'essai (80575)	N	1.7	1.7
56	0,85	0,1	1852	N	119	151
67	0,85	0,1	4400	O - 4	75.9	86.5
68	0,88	0,1	287	N	877	1070
68	0,85	0,1	5750	N	66.5	80.7
80	0,85	0,08	1874	O - 3	142	231
84	0,80	0,08	72716	O - 6	No	2.7
88	0,76	0,1	Arrêt de l'essai (252594)	O - 8	No	0.311
86	0,80	0,1	93713	O - 12	No	6.15
187	0,85	0,1	533	N	306	378
189	0,84	0,1	590	N	190	225

5. ANALYSE DES RÉSULTATS

La figure 4 montre que la propagation de la fissure est fortement liée au comportement différé du béton. Un regard à la figure 5 conduit à la remarque suivante: la propagation de la fissure (au temps t du chargement de fluage, l'évolution positive de la complaisance est uniquement attribuable à la propagation de la macrofissure) se produit toujours après une évolution négative de la complaisance.

Le tableau 3 présente la relation entre la vitesse d'évolution relative de la complaisance, le taux de chargement de fluage et la vitesse de fluage du déplacement (D25) (le nombre de valeurs concernant la vitesse de fluage de la flèche ne sont pas suffisantes, voir tableau 2). Cette vitesse d'évolution relative de la complaisance est donnée par $[C(t) - C_s] / C_s \times t^{-1}$.

Tableau 3. Vitesse d'évolution relative de la complaisance et vitesse de fluage du déplacement (D25)

P_s/P_0 (%)	80	80	85	85
$[(C(t)-C_s)/ C_s] \times t^{-1} (\times 10^{-4} s^{-1})$	0.02	0.03	0.5	1
Vitesse de fluage du déplacement (D25) ($\times 10^{-7}$ mm/s)	2.7	6.15	86.5	231

La figure 6 présente la courbe concernant la vitesse relative de la complaisance en fonction la vitesse de fluage du déplacement (D25).

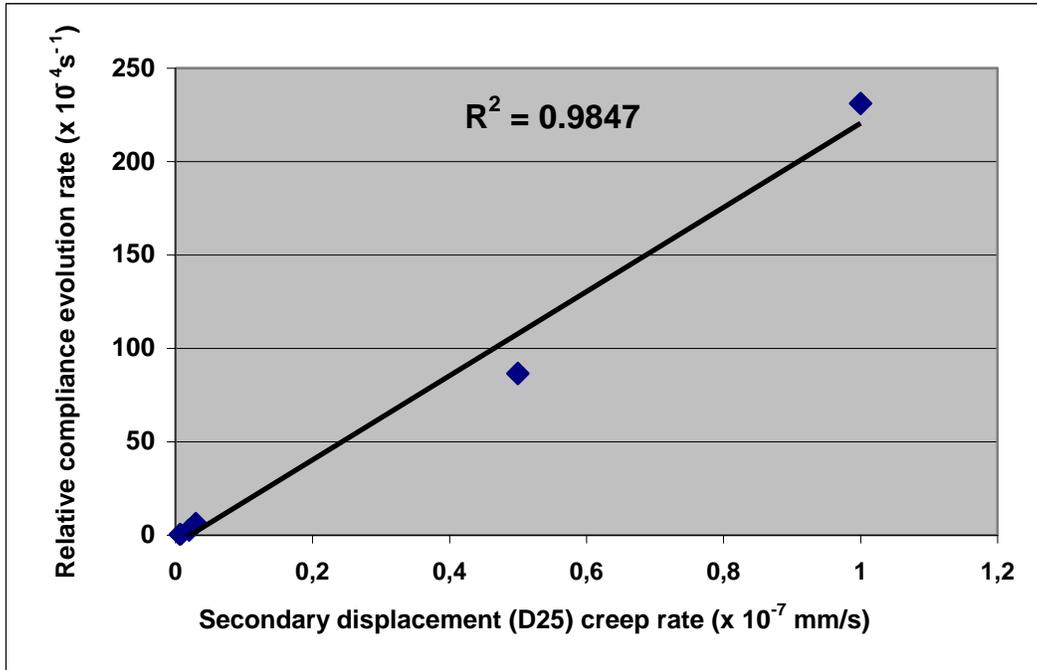


Figure 6. Vitesse d'évolution relative de la complaisance versus la vitesse de fluage du déplacement (D25)

D'après le tableau 3 et la figure 6, les remarques suivantes peuvent être faites lorsque la fissure se propage continuellement pendant le chargement de fluage (augmentation continue et croissante de la complaisance):

- la vitesse de propagation de la fissure (représentée par la vitesse de l'évolution relative de la complaisance) augmente avec le niveau de chargement de fluage.
- La vitesse de propagation de la fissure augmente avec la vitesse de fluage du déplacement (D25).

La propagation de la macrofissure étant directement (localement) liée à l'évolution du déplacement (D25), il paraît raisonnable d'émettre l'hypothèse suivante: lors du chargement de fluage, la vitesse de fluage de l'éprouvette en béton est la conséquence de la propagation lente et stable de la macrofissure.

En d'autres termes, la propagation stable de la macrofissure est à l'origine du fluage de l'éprouvette.

Cette conclusion doit être mise en relation avec le fait que le fluage propre en traction du béton est très faible par rapport au fluage propre en compression. En effet, une étude expérimentale récente, réalisée à l'IFSTTAR (Rossi et al., 2012) sur le même béton que celui de la présente étude, a clairement montré que le fluage propre en traction est environ 3 fois plus faible que celui en compression.

La figure 7 présente cette comparaison entre fluages propres en traction et en compression.

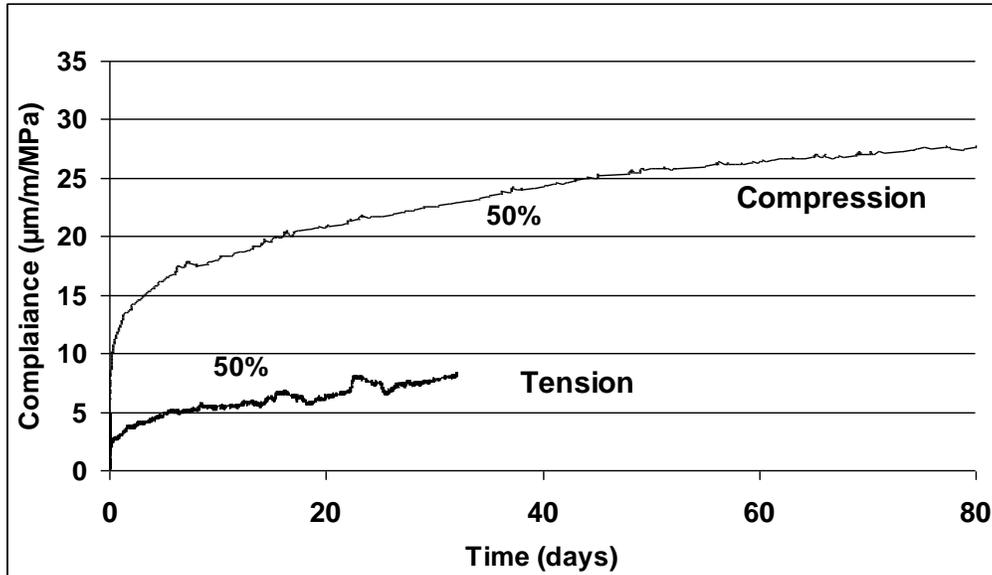


Figure 7. Comparaison entre les fluages propres en traction et en compression (après Rossi et al. 2012)

L'approche physique proposée qui permet d'expliquer ce résultat peut être résumée comme suit: **le fluage propre du béton est principalement due à la microfissuration qui induit un retrait d'auto-dessiccation supplémentaire (Rossi et al., 2012)**.

Si cette hypothèse physique est prise en compte au niveau de la zone microfissurée en pointe de macrofissure (en mécanique de la rupture, il est parfaitement connu qu'une macrofissure qui se propage dans du béton est précédée à sa pointe d'une zone microfissurée), il est facile de comprendre pourquoi le fluage propre du béton ne peut pas expliquer le comportement différencié d'une éprouvette fissurée et pourquoi, avant la propagation de la fissure, la complaisance de l'éprouvette ne peut que diminuer. La figure 8 illustre cette explication.

6. CONCLUSIONS

Cet article présente une étude expérimentale relative à la propagation d'une macrofissure dans une petite poutrelle en béton soumise à un chargement de fluage en flexion.

Plusieurs niveaux de chargement de fluage sont étudiés : de 0,76 à 0,88 fois l'effort qui a conduit à une flèche post-fissuration de 0,08 à 0,1 mm.

Toutes les éprouvettes testées sont protégées de la dessiccation durant le chargement de fluage.

Le principal résultat obtenu peut se décliner ainsi : la vitesse de fluage (flèche) de l'éprouvette en béton est la conséquence de la propagation lente et stable de la macrofissure. Ceci s'explique par le fait que la propagation de la fissure est liée à l'évolution (sous chargement constant) de la zone microfissurée en pointe de fissure, évolution générée par un retrait d'auto-dessiccation supplémentaire.

Cette hypothèse est renforcée par le fait qu'une étude antérieure a montré que le fluage propre en traction du béton est très faible comparé à son fluage en compression.

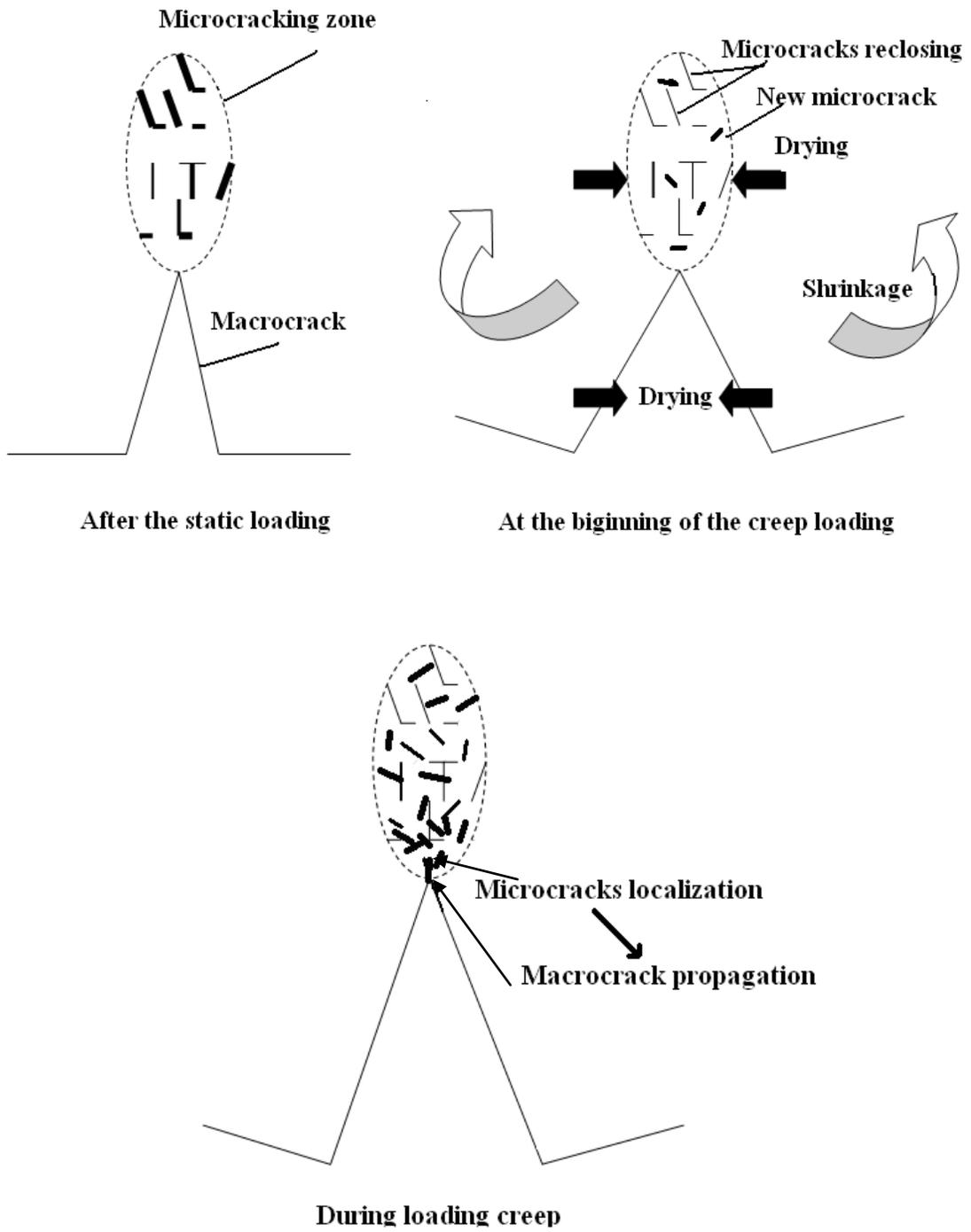


Figure 8. Schéma explicatif de la propagation d'une macrofissure sous sollicitation de fluage (dans le béton)

7. REFERENCES

- Bazant, Z.P., and Gettu, R. (1992) "Rate effects and load relaxation in static fracture of concrete." *ACI Materials Journal*, 89(5).
- Carpinteri, A., Valente, S., Zhou, F.P., Ferrara, G., and Melchiorri, G. (1997) "Tensile and flexural creep rupture tests on partially-damaged concrete specimens." *Materials and Structures*, 30, 269-276.
- Dénarié, E. (2000) "Etude expérimentale des couplages viscoélasticité-croissance des fissures dans les bétons de ciment." *Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne*, Doctoral Thesis no. 2195 (in french).
- Denarié, E., Cécot, C., and Huet, C. (2006) "Characterization of creep and crack growth interactions in fracture behavior of concrete." *Cement and Concrete Research*, 36, 571-575.
- Mazzotti, C., and Savoia, (2002) M. "Nonlinear creep, Poisson's ratio, and creep-damage interaction of concrete in compression", *ACI Materials Journal*, 99(5).
- Omar, M. et al. (2009) "Creep-damage coupled effects: experimental investigation on bending beams with various sizes." *Journal of Materials in Engineering*, ASCE 21 (65).
- Rossi, P. (1989) "Coupling between the crack propagation velocity and the vapour diffusion in concrete." *Materials and Structures*, 22, 91-97.
- Rossi, P., and Boulay, C. (1990) "Influence of free water in concrete on the cracking process." *Magazine of Concrete Research*, 42(152), 143-146.
- Rossi, P., Tailhan, J.L., Le Maou, F., Gaillat, L., and Martin, E. (2012) "Basic Creep Behaviour of Concretes. Investigation of the physical mechanisms by using acoustic emission." *Cement and Concrete Research*, 42, 61-73.
- Rüsch, H. (1960) "Researches toward a general flexural theory for structural concrete." *ACI Journal*, Proceedings, 57, 1-28, July.
- Smadi, M.M., Slate, F.O., and Nilson, A.H. (1985) "High-, medium-, and low-strength concretes subject to sustained overloads- strains, strengths, and failure mechanisms." *ACI Journal*, 657-664.
- Zhou, F.P. (1992) "Time-Dependent Crack Growth and Fracture in Concrete.(1992)." *TVBM-1011, University of Lund, Sweden*, Ph.D. Thesis.