
Analyse quantitative et qualitative par émission acoustique de l'endommagement du béton sous chargement de fluage

J. Saliba, A. Loukili, F. Grondin, J-P. Regoin

LUNAM Université, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes, Nantes.

jacqueline.saliba@ec-nantes.fr, ahmed.loukili@ec-nantes.fr, frederic.grondin@ec-nantes.fr, Jean-Pierre.Regoin@ec-nantes.fr

RÉSUMÉ. *Plusieurs théories ont été proposées dans la littérature pour expliquer les micro-mécanismes qui régissent le comportement différé du béton. Jusqu'à ce jour, les origines physiques du fluage sont encore mal connues et l'étude du mécanisme de fissuration dû au fluage est toujours d'actualité. Une investigation expérimentale est proposée ici pour étudier le couplage fluage-endommagement sur des poutres en béton chargées en flexion trois points. L'endommagement est défini comme la nucléation et la propagation des microfissures. En effet, on étudie la pertinence de l'hypothèse que les microfissures apparaissent durant le fluage. L'évaluation de l'endommagement durant les essais de fluage est effectuée à l'aide de la technique de l'émission acoustique. Les résultats ont montré une proportionnalité entre le taux de fluage et l'activité acoustique, avec un nombre d'évènement qui augmente avec le taux de chargement. De plus, les mécanismes de fluage propre et de fluage de dessiccation ont pu être distingués par plusieurs classes.*

ABSTRACT. *The physical origins of creep in concrete are still poorly understood even though some researchers have proposed hypotheses concerning the physical mechanisms that govern this delayed behaviour. An experimental investigation was proposed here in order to study the coupling between creep and damage with specimens loaded in flexion. This article concerns the use of the acoustic emission technique as a tool to provide information on the pertinence of the physical hypothesis. The applicability of the AE technique to assess damage evolution under creep is investigated. The results show a good proportionality between the deformation measurements and the AE monitoring. In addition we have distinguished two classes in basic creep and three classes in desiccation creep.*

MOTS-CLÉS : *béton, fluage, endommagement, émission acoustique, flexion.*

KEY WORDS: *concrete, creep, damage, acoustic techniques, flexural test.*

1. Introduction

Les grands ouvrages en béton sont susceptibles de se dégrader dû à des déformations différées internes au matériau. Ces déformations apparaissent lorsque l'ouvrage est soumis à des efforts élevés de fluage. La déformation de fluage est conventionnellement décomposée en une déformation de fluage propre et de fluage de dessiccation. Le fluage propre peut être décomposé en deux phases : le fluage à court terme dû à un processus de micro-diffusion de l'eau capillaire (Ulm, 1999 ; Ghosh, 1973) et le fluage à long terme indépendant du type du béton, son origine se trouvant dans les pores d'hydrates et au phénomène de rupture potentielle des liaisons atomiques dans les zones d'adsorption empêchées (Bazant, 1997). Dans le cas du fluage en dessiccation, le béton en cours de séchage flue plus que le béton protégé qui reste quant à lui à une hygrométrie élevée (effet Picket). Les causes du fluage de dessiccation peuvent être rassemblées en deux groupes (Bazant, 1985,1994 ; Brooks, 2001) : la part structurale liée à une diminution des effets de structure et la part intrinsèque due aux mécanismes physico-chimique. Il est généralement accepté que le fluage est la combinaison de plusieurs mécanismes qui agissent ensemble surtout à l'échelle des produits hydratés (théorie du flux visqueux, plastique, du suintement, consolidation, micro-contrainte, l'eau adsorbée...). La connaissance du comportement du béton en statique ne suffit pas et une connaissance précise du mécanisme du fluage devient essentielle. L'objectif de ce travail est donc de mieux comprendre le mécanisme du fluage et d'étudier la pertinence de l'hypothèse physique proposée par Rossi (Rossi, 1994) qui a considéré que des microfissurations apparaissent durant le fluage et influencent l'évolution de l'endommagement. Une investigation expérimentale est proposée ici sur des poutres de béton soumises à un fluage en flexion trois points dans des conditions endogènes et de dessiccation. La technique non destructive de l'émission acoustique (EA) a été utilisée pour localiser la microfissuration au cours du fluage. L'EA est liée au phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant de micro-déplacements locaux internes au matériau (mécanismes de rupture, frottement, impacts mécaniques, micro-fissuration, etc). Cette méthode permet de localiser d'éventuelles microfissures naissantes et d'évaluer l'intensité du dommage.

2. Programme expérimental

Le béton étudié est composé de granulats calcaires concassés, d'un ciment CEMII 42.5, d'un superplastifiant (Glenium 21) et de l'eau (Tableau 1). Le rapport gravier sur sable (G/S) est égal à 1,2. Cette formulation est caractérisée par un rapport eau sur ciment de 0,56 et un affaissement de 70 mm.

Constituants	Dosage (Kg/m ³)
Granulat: 5/12,5 mm	936.0
Sable: 0/5 mm	780.0
Ciment: CEMII 42.5	350.0
Eau	219.5
Superplastifiant: Glenium	1.9

Tableau 1. Formule du béton testé.

La résistance en compression (f_c), la résistance à la traction (f_t) et le module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) ont été mesurés sur des éprouvettes cylindriques $\square 110 \times 220 \text{ mm}^2$ à 28 jours. f_t est déterminée à partir de l'essai brésilien et E_{dyn} à l'aide du Grindosonic. Tous les tests ont été réalisés sur trois échantillons et la valeur moyenne des propriétés mécaniques est donnée dans le tableau 2.

Propriétés	f_c	f_t	E_{dyn}
MPa	42.6	3.7	39 000

Tableau 2. Propriétés mécaniques du béton.

Les essais de fluage ont été menés sur des éprouvettes prismatiques entaillées de dimensions $100 \times 200 \times 800 \text{ mm}^3$ avec une hauteur d'entaille de 0.2% de la hauteur de la poutre. Ces poutres ont été conservées pendant 3 mois dans de l'eau à 20°C saturée en chaux pour éviter le séchage et une hydratation supplémentaire. Puis elles ont été chargées avec de forts niveaux de force équivalents à 70 et 85% de la capacité maximale (mesurée par des essais de flexion 3 points selon la procédure définie par la RILEM (Hillerborg, 1985)). Les essais de fluage en flexion ont été réalisés sur des bâtis de fluage spécifiques dans une salle régulée en température à 20 °C ($\pm 2^\circ\text{C}$) et en hygrométrie à 50 % ($\pm 5\%$). Trois conditions hygrométriques ont été évaluées : fluage propre, fluage en dessiccation et fluage endogène suivi d'une phase de dessiccation. Durant chaque essai, la déformation de fluage est obtenue par la mesure de la flèche au milieu de la poutre à l'aide d'un capteur LVDT.

Le dispositif d'acquisition et de traitement des signaux d'émissions acoustiques est constitué d'un système d'acquisition MISTRAS 8 voies. Huit capteurs piézoélectriques sont placés sur les deux faces de l'éprouvette autour de la zone entaillée, la zone de propagation de la fissure. Les capteurs forment ainsi deux mailles de localisation trapézoïdale ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) sur chaque face (Figure 1). Ils sont positionnés sur les éprouvettes avec une faible couche de silicone chassée d'air. Cette technique permet de garantir un meilleur couplage entre les capteurs et l'éprouvette et par conséquent assurer une bonne transmission des signaux qui sont amplifiés par un amplificateur ayant un gain de 40 dB. Un seuil de détection de 35 dB a été choisi pour éliminer le bruit de fond. Pour qu'une source soit localisée, il

suffit qu'une salve atteigne au moins quatre capteurs parmi les 8. La précision de localisation mesurée est de l'ordre de 5 mm. Cette procédure permet d'estimer, d'une part, la vitesse de propagation et d'autre part, l'atténuation des ondes acoustiques dans le matériau. La vitesse de propagation mesurée dans notre étude est de 38000 m/s. Les signaux acoustiques générés par les éprouvettes sont numérisés et analysés à l'aide des logiciels AWin et Noesis (Europhysical Acoustics).

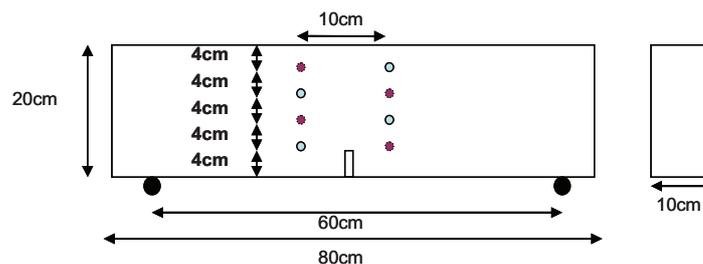


Figure 1. Géométrie de la poutre et position des capteurs EA.

3. Analyse des résultats

3.1 Influence du chargement sur les déformations de fluage

Le fluage en flexion a été peu étudié (Omar et al., 2009 ; Bazant, 1994). Ceci peut être expliqué par le fait que les essais de fluage en flexion ne permettent pas d'identifier les mécanismes concernés. La figure 2 présente les courbes de fluage propre et de dessiccation obtenues pour les différents niveaux de chargement. Le fluage est défini comme étant la différence entre la flèche totale sous charge et la flèche élastique instantanée. Les résultats montrent que la déformation de fluage peut être séparée en trois zones : le fluage primaire caractérisé par une décroissance rapide de la vitesse de déformation, le fluage secondaire correspondant à un état stationnaire pour lequel la vitesse de déformation est pratiquement constante, et le fluage tertiaire caractérisé par une augmentation très rapide de la vitesse de déformation. En dessiccation, le processus est plus rapide qu'en endogène. Cet excès de déformation avec le fluage de dessiccation est dû au retrait induit par la contrainte qui résulte en une courbure additionnelle dans le moment de chargement (Bazant, 1994).

En comparant le fluage des poutres ayant subies différents niveaux de chargement, on peut remarquer que l'amplitude et la cinétique des déformations différées augmentent avec le taux de chargement. Cela peut s'expliquer par la nucléation de microfissures dues à la charge appliquée qui modifie le taux de fluage (Ngab, 1981 ; Rossi, 1994). En effet, les microfissurations initiées par la charge appliquée commencent à augmenter et forment un chemin de fissuration (Bazant, 1992).

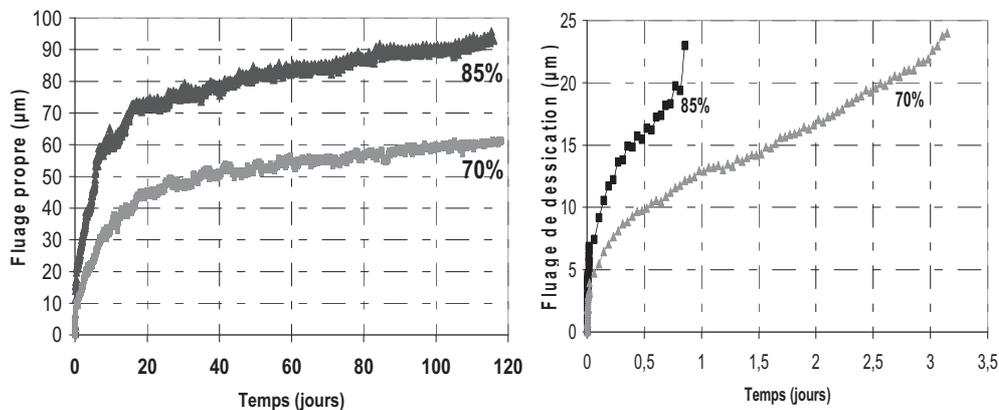


Figure 2. Fluage propre et de dessiccation des poutres chargées en flexion à 70 % et 85 % de la charge maximale.

3.2 Suivi des EA durant l'essai de fluage

Les poutres soumises au fluage en flexion ont été aussi suivies à l'aide de la technique d'EA pendant plus de deux mois et les différentes salves ont été enregistrées durant cette période. Deux types d'essais ont été réalisés :

- essais A qui concernent des poutres en fluage de dessiccation où le suivi des EA a été effectué jusqu'à la rupture avec 70% et 85% de chargement,
- essais B qui concernent des poutres en fluage endogène avec les mêmes niveaux de chargement.

Afin d'avoir une idée précise sur la différence de comportement entre le fluage propre et de dessiccation, une poutre de l'essai B, chargée à 85 %, a été soumise à la dessiccation après deux mois de fluage endogène. A noter que le même comportement microstructurel est obtenu avec les essais de type A et B. L'analyse des données d'émission acoustique a été réalisée en deux parties : l'analyse qualitative et l'analyse quantitative.

3.3 Analyse quantitative : corrélation entre les courbes de rupture et les cartes de localisation

L'analyse quantitative est le suivi de l'endommagement réalisé en faisant la corrélation entre la déformation de fluage et le nombre d'évènements ainsi que l'évolution des caractéristiques des signaux, par exemple l'énergie et l'amplitude. La localisation de l'endommagement est aussi détectée en fonction de la longueur et de la largeur de l'éprouvette.

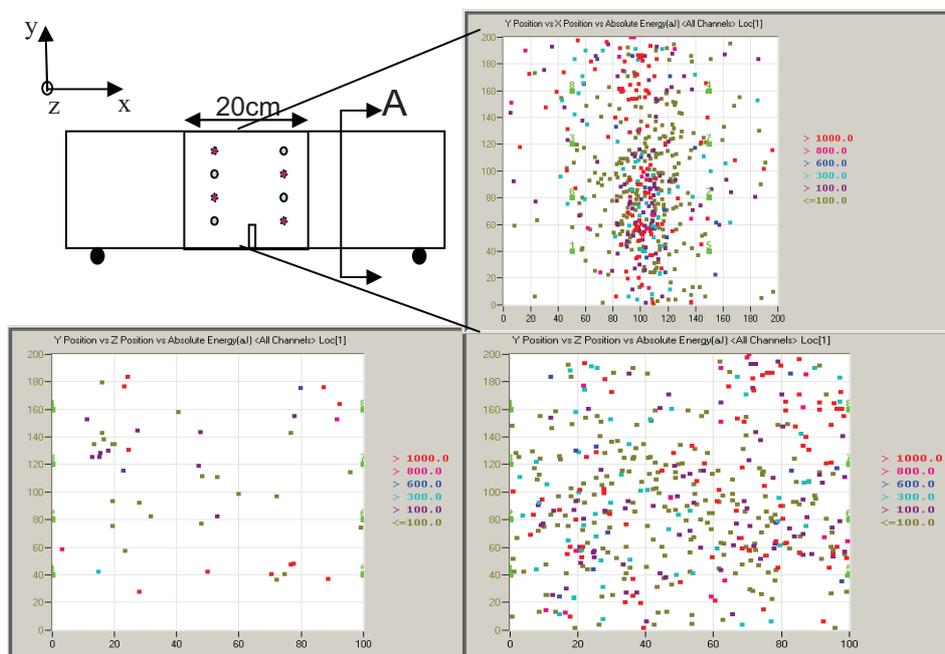


Figure 3. Localisation de l'endommagement au cours de l'essai de fluage : a) localisation des évènements en fonction de x et de y pendant toute la durée de l'essai b) localisation en fonction de y et z pendant le fluage propre et c) le fluage de dessiccation jusqu'à la rupture.

La figure 3 présente les résultats de localisation des EA en fonction des positions x , y et z pendant les deux premiers mois de fluage propre suivi du séchage jusqu'à la rupture. La figure 3b représente la localisation des évènements en fonction de x et de y sur une section de $(20 \times 20 \text{ cm}^2)$ dès le début de l'essai et jusqu'à la rupture. Les évènements sont principalement présents au dessus de l'entaille là où les contraintes sont les plus élevées. Pendant le fluage propre, les évènements étaient diffus et au moment du séchage le nombre d'évènements a augmenté avec une cinétique plus grande et se sont localisés au niveau de l'entaille suivi d'une propagation conique avant la rupture. Les figures 3c et 3d représentent la carte de localisation des EA en fonction de y et de z dans le cas du fluage propre et de dessiccation. Pendant le fluage propre les évènements sont distribués tout au long de l'épaisseur de l'éprouvette. Quand l'éprouvette est exposée au séchage, le nombre d'EA a augmenté sur les deux faces soumises à la dessiccation. Ces évènements sont probablement dûs au retrait. A noter que la vitesse de propagation des ondes acoustiques varie légèrement au cours de l'essai.

De plus, les résultats ont montré une proportionnalité entre le taux de fluage et l'activité acoustique en termes de nombre d'évènement et des différents paramètres des signaux : nombre de coups, amplitude, énergie... (figure 4). Avec un nombre

d'évènements qui augmente avec le taux de chargement et qui suit la vitesse de développement de la déformation. Ils augmentent rapidement pendant le fluage primaire avec des signaux de forte amplitude ; puis se stabilisent pendant le fluage secondaire. Au moment du séchage, ils augmentent rapidement avec de fortes amplitudes et diminuent progressivement en parallèle avec le retrait qui diminue au fur et à mesure jusqu'à la rupture avec des signaux de fortes amplitudes et très énergétiques.

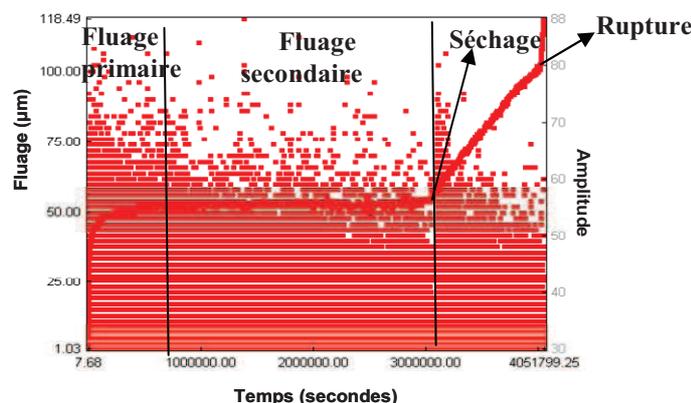


Figure 4. Corrélation entre la courbe de fluage et les amplitudes des salves EA en fonction du temps au cours de l'essai de fluage

La majorité de l'énergie libérée pour initier la fissuration apparaît pendant le fluage de dessiccation et dépend du taux d'endommagement initial indiquant l'apparition de la zone d'endommagement qui commence à se créer au front de l'entaille. Les données obtenues permettent d'estimer l'état d'endommagement du béton à un stage inférieur de déformation avant la formation des microfissures. De plus, l'augmentation de l'énergie pendant la troisième phase est un indicateur de la propagation de la fissure.

3.4 Analyse qualitative : identification des mécanismes de fluage.

L'analyse qualitative consiste à établir une classification des données d'émissions acoustique ou, en d'autres termes, à regrouper des signaux ayant des caractéristiques semblables pour pouvoir par la suite les associer à un ou plusieurs mécanismes d'endommagement du matériau. Cette analyse repose sur les paramètres issus de l'analyse temporelle conventionnelle des données d'EA (amplitude, énergie, nombre de coups, etc...) afin de distinguer, d'une part, la signature correspondant aux différents mécanismes d'endommagement du matériau (microfissuration, décohésion de la pâte et des granulats et la rupture des granulats), et d'autre part leur chronologie d'apparition. La méthode de classification utilisée dans cette analyse est la méthode non supervisée de « K- moyenne » associée à une analyse en composantes principales (ACP) (figure 6) et le dendrogramme (figure 5).

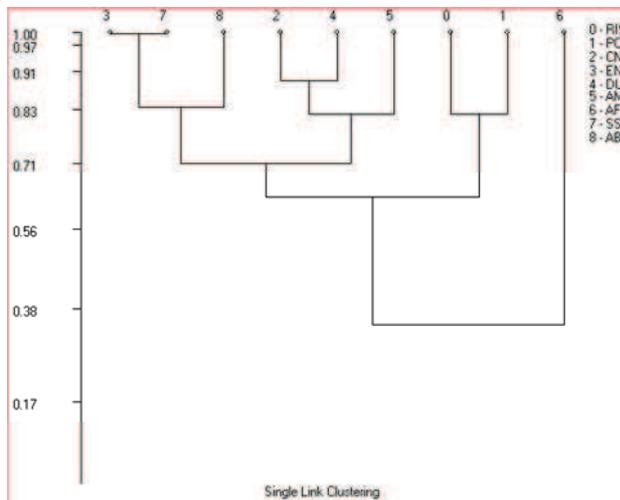


Figure 5. Dendrogramme de classification.

À partir de l'étude statistique multivariable, on a pu distinguer deux classes en fluage propre et trois classes en fluage de dessiccation (figure 6). Dans le cas du fluage propre, la première classe correspond à des signaux de faible amplitude et d'énergie qu'on peut associer à des microfissurations à l'interface pâte-granat et la deuxième classe correspond à des signaux de forte amplitude qu'on peut associer à des microfissurations dans la matrice (Rossi, 1989) (figure 7). Pour le fluage de dessiccation on peut ajouter une autre classe qui correspond aux signaux dus à la dessiccation du béton. Ces signaux sont caractérisés par une énergie et une amplitude très faibles. De plus on peut remarquer qu'à partir du moment où on a soumis la poutre à la dessiccation, le nombre d'évènements correspondant à cette classe augmente rapidement à cause de la dessiccation, puis diminue au fur et à mesure avec le taux de retrait (figure 8). Enfin, on peut remarquer que le nombre d'évènements de la deuxième classe, qui est très énergétique, devient supérieur en dessiccation par rapport au fluage propre.

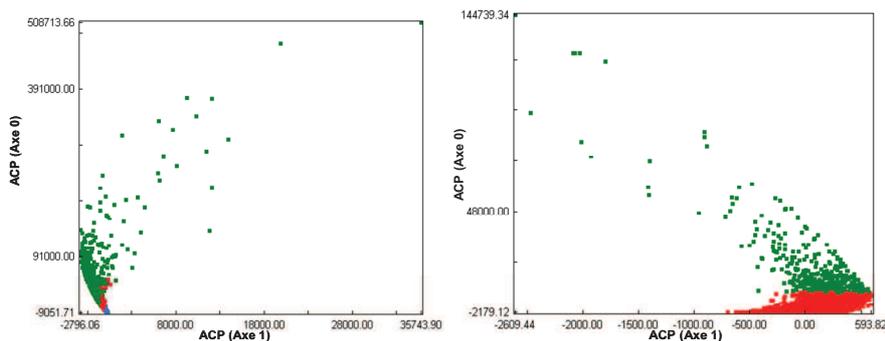


Figure 6. Visualisation des familles de l'analyse en composante principale a) pour le fluage propre et b) le fluage de dessiccation

Analyse quantitative et qualitative par émission acoustique de l'endommagement du béton sous chargement de fluage

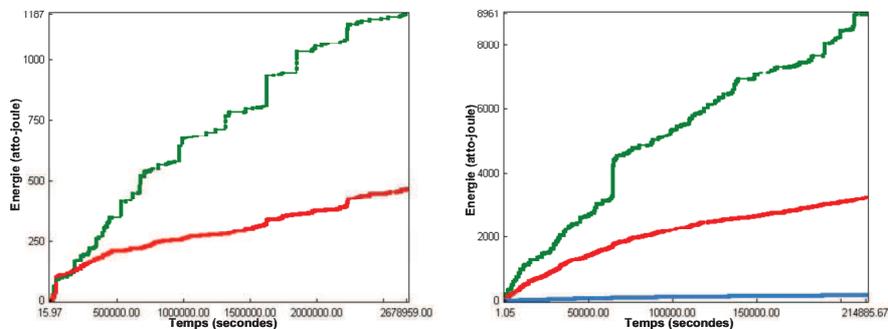


Figure 7. Evolution de l'énergie de chacune des classes a) pour le fluage propre et b) le fluage de dessiccation.

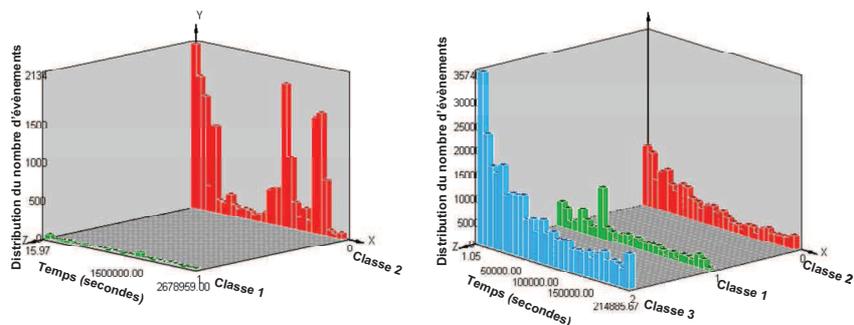


Figure 8. Chronologie d'apparition des classes en fonction du temps a) pour le fluage propre et b) le fluage de dessiccation.

Finalement au moment de la rupture le nombre d'évènement augmente rapidement avec des signaux très énergétiques et des amplitudes aux alentours de 100dB.

4. Conclusion

Les résultats de ce travail ont permis d'analyser le comportement des poutres sollicitées en fluage de flexion. Ils montrent que la technique d'EA est une méthode très pertinente pour détecter l'endommagement et la localisation des microfissures pendant les trois phases de fluage. Une bonne corrélation a été observée entre la déformation de fluage et la variation des différents paramètres acoustiques. A partir de cette étude, on peut avoir suffisamment de données pour pouvoir prédire le fluage non linéaire et la rupture des matériaux cimentaires soumis à des charges importantes et sur de longues durées. De plus, ces résultats nous permettent de mieux comprendre l'influence du fluage sur la fragilité du béton observée lors de la rupture des poutres soumises au fluage avec des essais de flexion trois points (Saliba et al., 2010).

5. Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet MEFISTO financé par l'Agence National pour la Recherche (ANR) dans le programme « Villes Durables » sous le numéro VD08_323065.

6. Références

- Bazant Z.P., Chern J.C., "Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism", *Matériaux et Constructions*, Vol.18, N°103, pp.1-20, 1985.
- Bazant Z.P., Gettu R., "Rate effects and load relaxation in static fracture of concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.89, N°5, 1992, pp.456-468.
- Bazant Z.P., Li Y., "Cohesive crack with rate-dependent opening and viscoelasticity: I.mathematical model and scaling", *International Journal of Fracture*, Vol.86, 1997, pp.247-265.
- Bazant Z.P., Raftshol W.J., "Effect of cracking in drying and shrinkage specimens", *Cement and Concrete Research*, Vol.12, 1982, pp.209-226.
- Bazant Z.P., Yunping X., "Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms", *Materials and structures*, Vol.27, 1994, pp.3-14.
- Brooks J.J., "The influence of pore stress on creep of hardened cement paste, creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials", F.J. Ulm, Z.P. Bazant, F.H. Wittmann, Elsevier, Cambridge, 2001, pp.61-66.
- Ghosh R.S., "A hypothesis on mechanism of maturing creep. *Matériaux et Constructions* ", Vol. 6, N°31, 1973.
- Hillerborg A., "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_f of concrete", *Materials and Structures*, Vol.18, N°.106, 1985, pp.291-296.
- Ngab A.S., Slate F.O., Nilson A.H., "Microcracking and time-dependent strains in high strength concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.11, 1981, pp.262-268.
- Omar M., Loukili A., Pijaudier-cabot G., Le Pape Y., "Creep-damage coupled effects: experimental investigation on bending beams with various sizes", *Journal of materials in civil engineering*, Vol.21, N°.2, 2009, pp.65-72.
- RILEM 50-FMC Recommendation, Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams, *Materials and Structures*, Vol.18, 1985, pp.285-290.
- Rossi P., Godart N., Robert J.L., Gervais J.P., Bruhat D., "Investigation of the basic creep of concrete by acoustic emission", *Materials and Structures*, Vol. 27, 1994, pp.510-514.
- Rossi P., Robert J.L., Gervais J.P., Bruhat D., Identification of the physical mechanisms underlying acoustic emissions during the cracking of concrete, *Materials and structures*, Vol.22, 1989, pp.194-198.
- Saliba J., Grondin F., Loukili A., Regoin J-P., "Coupling creep and damage in concrete under high sustained loading", *Framcos-7*, 23-28 May 2010, Jeju, Korea.
- Ulm F.J., Le Maou F., Boulay C., "Creep and shrinkage coupling: new review of some evidence", *Revue française de genie civil*. Vol. 3, n°3-4, 1999, pp. 21-37.