

# 10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

## Contrôle de Santé de Béton Polymère en Fluage par Emission Acoustique

R. Berbaoui, A. El Mahi, J.H. Thomas & R. El Guerjouma

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine., UMR CNRS 6613  
Avenue Olivier Messiaen, 72085 Mans CEDEX 9, e-mail : Rachid.berbaoui@univ-lemans.fr

Le béton de polymère est l'objet d'un intérêt croissant et de recherches importantes dus à sa large gamme d'applications possibles notamment dans le génie civil. Cette classe de matériaux est constituée d'un liant de polymère thermoplastique ou thermodurcissable, et d'une charge minérale comme le gravier ou la pierre concassée et du sable. La connaissance du comportement mécanique de ces matériaux en statiques ne suffit pas et son développement nécessite des études complémentaires sur son comportement dynamique sous des charges importantes et sur de longues durées comme le fluage. L'objectif de ce travail est d'analyser l'endommagement et la rupture de ces matériaux sollicités en fluage en utilisant l'Emission Acoustique (EA). Une analyse statistique multivariable des signaux d'EA collectés est effectuée. La classification de ces signaux basée sur une méthode de coalescence floue a permis d'identifier trois classes correspondant aux signatures acoustiques de trois mécanismes d'endommagement (fissuration matricielle, décohésion interfaciale et rupture des agrégats) et leur chronologie d'apparition pendant l'essai. Une assez bonne corrélation entre la durée du fluage primaire, repérée par un minimum d'activité acoustique et le temps à rupture ou l'activité acoustique est très forte a été constatée. Ce résultat important montre les liens entre les deux phases et permet d'envisager un moyen efficace d'estimation de la durée de vie résiduelle de ces matériaux en fluage.

### 1 Introduction

Le béton de polymère est l'objet d'un intérêt croissant de recherches dû à sa large gamme d'applications possibles notamment dans la construction civile [1]. Cette classe de matériaux est constituée d'un liant de polymère, parfois thermoplastique mais généralement thermodurcissable, et d'une charge minérale comme le gravier ou la pierre concassée et du sable. Les résines les plus généralement utilisées sont les polyesters, Poly (métha- crylate de méthyle), et les époxydes. Comparativement au béton de ciment Portland, le béton polymère possède une plus grande résistance mécanique, résiste mieux aux produits chimiques et aux agents corrosifs, absorbe moins d'eau et présente une plus grande stabilité aux cycles gel-dégel [2]. La connaissance du comportement de ces matériaux en statique ne suffit pas et son développement nécessite des informations complémentaires sur son comportement sous des charges importantes et sur de longues durées. Une connaissance précise du comportement en fluage devient essentielle. Dans ce domaine, les essais non destructifs comme les ultrasons et l'émission acoustique sont peu utilisés en fluage notamment en termes de prédiction de la rupture. Des travaux récents ont proposé une approche qui consiste à étudier la rupture à travers des phénomènes de transitions de phase en fluage [3-5]. Dans cette perspective Nechad et al [3] ont analysé l'évolution du taux de déformation et du taux de l'émission acoustique en fluage dans les phases du fluage primaire et tertiaire, sur des matériaux composites à matrice polyester renforcée par des fibres de verre. Ils ont mis en place une relation entre le temps de transition primaire/secondaire correspondant au minimum du taux de déformation et le temps de rupture du matériau. Notre contribution se situe dans ce cadre avec comme objectif l'analyse par émission acoustique de l'endommagement et de la rupture de matériaux granulaires à base polymère sollicités en fluage, et la possibilité de

prédire la rupture en fonction de l'évolution de l'activité acoustique au cours des essais de fluage.

### 2 Matériaux et dispositif expérimental

Le matériau utilisé dans ce travail est un matériau granulaire à base polymère type béton synthétique. Ce matériau est élaboré à partir d'une matrice polymère résine époxyde renforcée par des granulats et du sable. La mise en œuvre est réalisée au sein du laboratoire avec le dosage suivant : 40% de sable fin, 30% d'agrégats et 30% de résine époxyde. Après un temps de polymérisation de quelques jours à température ambiante, les éprouvettes parallélépipédiques sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir d'une plaque de 250 \*250 mm<sup>2</sup> de surface et de 15 mm d'épaisseur. Les dimensions des éprouvettes sont : L = 160 mm, l = 40 mm et b = 15mm, où L, l et b sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur des éprouvettes. Les éprouvettes sont ensuite sollicitées en flexion 3-points avec une distance entre appuis prise égale à 120mm. Les essais sont effectués sur une machine d'essais hydraulique universelle type INSTRON modèle 8516 de 100 kN de capacité, où le pilotage et l'acquisition se font par ordinateur (fig.1). Les essais de fluage d'une dizaine d'éprouvettes sont effectués avec une charge appliquée de 3000 N.

Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide de la mesure d'émission acoustique. La figure 1 présente une vue d'ensemble du dispositif d'émission acoustique. Un système d'acquisition (EPA) comprenant 4 voies avec une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz est utilisé. Ce système est composé d'une carte d'acquisition PCI reliée à un micro-ordinateur. Les signaux d'émission acoustique sont enregistrés par 4 capteurs différentiels piézoélectriques de type Micro-80, de bande passante 100 kHz – 1 MHz et de 10 mm de diamètre, positionnés sur les éprouvettes avec

une graisse silicone. Ces signaux sont amplifiés par un préamplificateur avec un gain de 40 dB. Ils sont ensuite convertis par la carte PCI, qui les numérise et procède à l'extraction des paramètres d'émission acoustique. Les données issues des cartes sont transmises au micro-ordinateur, permettant l'affichage en temps-réel, le stockage et le post-traitement des données.

Un seuil de détection de 42 dB est utilisé pour détecter les temps d'arrivées et de fin des signaux d'EA. La distribution d'amplitude a pour intervalle 0-100 dB (0 dB correspond à 1  $\mu$ V en sortie du transducteur). Le système d'acquisition est calibré avant chaque essai en utilisant la procédure de casser de mine (Nielsen, 1989) [6]. Ce test permet d'estimer la vitesse de propagation et l'atténuation des ondes acoustiques dans le matériau qui est de 3000 m/s.

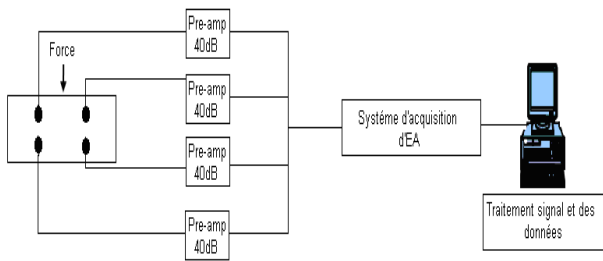


Figure 1 : Synoptique du système d'émission acoustique.

Plusieurs descripteurs temporels sont calculés par le système d'acquisition pour chaque salve d'EA (figure 2) : l'amplitude maximale du signal, l'énergie, la durée, le nombre de coups (nombre de franchissements du seuil de détection par le signal sur toute sa durée), le temps de montée (temps qui sépare le premier dépassement de seuil et l'amplitude crête du signal), etc. La plupart de ces paramètres sont définis en fonction du choix du seuil de détection lors de l'acquisition, permettant de sélectionner les parties du signal ultrasonore correspondant à des salves d'émission acoustique. Ce seuil est généralement fixé à une valeur légèrement supérieure au bruit de fond. Les signaux d'émission acoustique collectés sont traités par la méthode de la coalescence floue et par l'ACP. Cette classification est réalisée avec quatre paramètres : temps de montée, amplitude, durée, et fréquence moyenne.

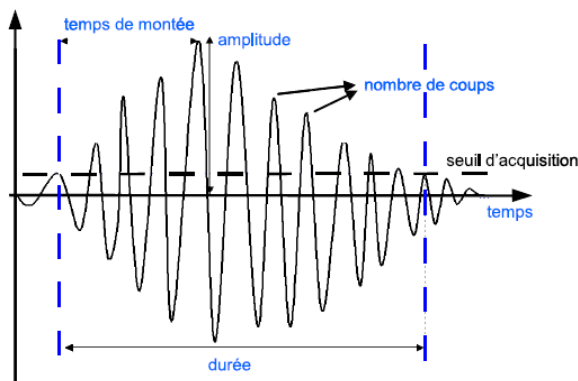


Figure 2 : Principaux paramètres temporels d'une salve d'émission acoustique.

## 3 Résultats et analyse

### 3.1 Résultats

L'activité d'émission acoustique collectée au cours d'un essai de fluage sur les éprouvettes a été étudiée dans un premier temps en termes d'amplitude et de nombre de signaux collectés en fonction du temps. Les figures 3 et 4 représentent l'amplitude des salves et le nombre de salves cumulées enregistrées en fonction du temps pour un essai de fluage.

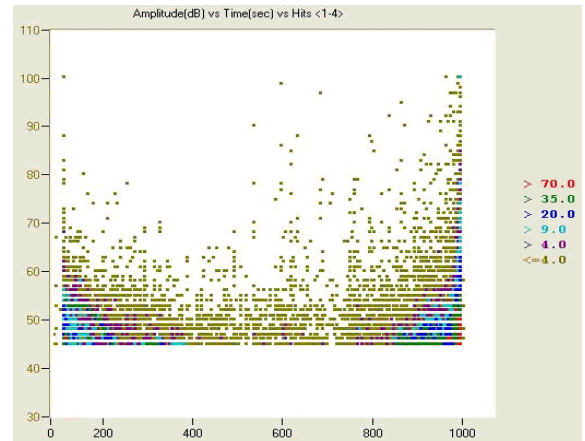


Figure 3 : Amplitude des salves en fonction du temps au cours d'un essai de fluage

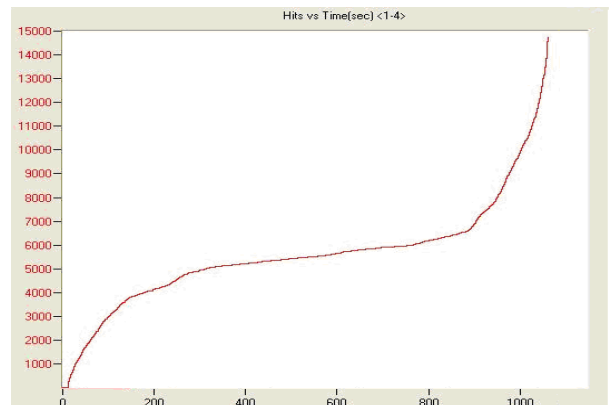


Figure 4 : Nombre de salves cumulées au cours d'un essai de fluage

Les résultats obtenus montrent que l'activité acoustique au cours des essais de fluage se déroule en 3 phases :

- dans la première phase, est observé une augmentation très importante de l'activité acoustique dès le début des essais qui correspond à une initiation et une multiplication des microfissures au sein de l'éprouvette, ces signaux ont une amplitude comprise entre 42 dB et 75dB.

- pendant la deuxième phase, l'activité acoustique est faible, où les signaux ont une amplitude comprise entre 42 dB et 90 dB. Cette phase est due à la propagation des microfissures, et correspond à une grande partie de la durée de vie de l'éprouvette.

- enfin dans la dernière phase, très courte, l'activité acoustique redevient très importante et très énergétique où l'amplitude atteint par fois les 100 dB. Cette phase correspond à la propagation rapide des microfissures générant ainsi une fissuration plus localisée entraînant la rupture de l'éprouvette. Cette phase engendre des signaux couvrant toutes les gammes d'amplitudes, correspondant

visiblement à plusieurs mécanismes d'endommagement. L'étude de ces mécanismes d'endommagement et leur discrimination est menée par une analyse statistique multivariable et sera analysée dans le paragraphe 3.2.

La localisation de l'endommagement par émission acoustique est détectée en fonction de la position X et Y qui représentent les coordonnées respectivement suivant la longueur et la largeur de l'éprouvette. La figure 5 représente la localisation des signaux d'émission acoustique dans l'éprouvette au cours d'un essai de fluage. La plupart des événements sont localisés sur la surface entre les quatre capteurs jusqu'au moment de la rupture, où la majorité de ces signaux sont concentrés dans la zone de rupture. Il a été observé qu'au début du chargement, les événements d'émissions acoustiques apparaissent dans la zone tendue (face inférieure) et en face de la charge de l'éprouvette. Après cette période, une distribution plus dispersée des événements a été observée dans la longueur et la largeur de l'éprouvette au cours de l'essai jusqu'à la rupture.

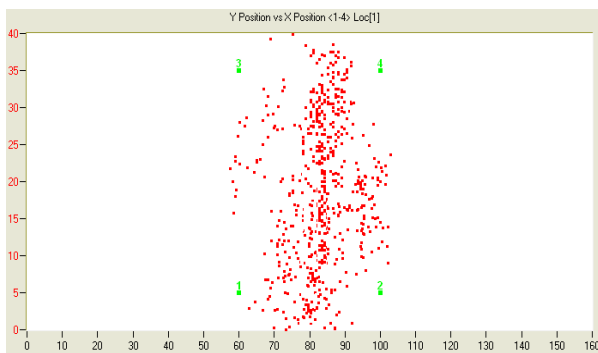


Figure 5: Position des capteurs (en vert) et localisation des microfissures au cours d'un essai en fluage

### 3.2 Analyse statistique multivariable des données d'EA

Les méthodes d'analyse statistique multivariable permettent de définir les ressemblances ou les différences entre les données en prenant en compte  $n$  paramètres. Ces paramètres qui peuvent être temporels, fréquentiels ou temps-fréquence. Les données sont séparées en classes, chaque classe définissant un type d'endommagement. La méthode utilisée dans cette analyse est la méthode de coalescence floue [7,8] associée à une analyse en composantes principales (ACP) [9-10].

La méthode de coalescence floue (FCM) permet d'obtenir une classification non supervisée dans le cas de données multidimensionnelles. Cette méthode utilise une partition floue de l'espace des données de telle sorte que chaque vecteur de forme  $x_j$  ( $j=1,n$ ) peut appartenir à chacune des classes  $\omega_i$  ( $i=1,M$ ) avec différentes valeurs d'appartenance  $u_i(x_j)$  comprises entre 0 et 1.

L'analyse en composantes principales (ACP) est utilisée pour pouvoir améliorer la visualisation des résultats de la classification réalisée avec la méthode de coalescence floue. L'ACP permet de diminuer le nombre de dimensions et les données peuvent ainsi être visualisées dans un plan par exemple. Le but de cette approche est de trouver un ensemble de  $M$  vecteurs orthogonaux (vecteurs propres de la matrice de corrélation) dans l'espace de données qui prennent le mieux en compte la variance des données. On projette alors les données de leur espace à  $N$  dimensions vers le sous-espace à  $M$  dimensions défini par ces vecteurs et on procède alors à une réduction de dimension.

Ces méthodes ont été utilisées pour analyser les signaux acoustiques collectés au cours des essais de fluage et sont appliquées avec trois classes. Ils correspondent aux signatures acoustiques de trois types d'endommagement qui sont la fissuration matricielle de la résine, la décohésion interfaciale de l'agrégat et résine et la rupture des granulats. Les figures 6 et 7 présentent les distributions d'amplitude de chacune des classes et la chronologie d'apparition des trois types d'endommagement en fonction du temps au cours des essais de fluage. La première classe (classe A) correspond à la signature acoustique de la microfissuration matricielle. Les signaux de cette classe ont une amplitude comprise majoritairement entre 42dB et 60dB. La seconde classe (classe B) observée (8%) a une distribution d'amplitude comprise majoritairement entre 50dB et 90dB et correspond à la décohésion interfaciale granulats/résine. La troisième classe (classe C) moins de 2% des signaux d'EA, correspond à 95-100dB d'amplitude. Ce signal très énergétique apparaît en fin d'essai et correspond à la rupture des granulats.

La chronologie d'apparition des différents types d'endommagement (figure 7) montre que les microfissurations matricielles sont les mécanismes d'endommagement prépondérants durant les essais, la décohésion interfaciale qui commence dès le début est moins importante que la microfissuration matricielle. En fin d'essai, quelques ruptures de granulats apparaissent et conduisent à la rupture des matériaux.

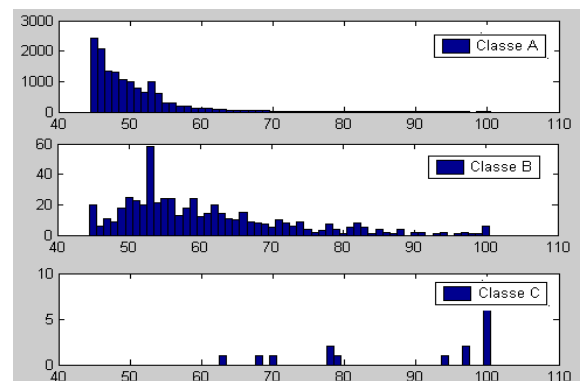


Figure 6 : Distribution d'amplitudes de chacune des classes

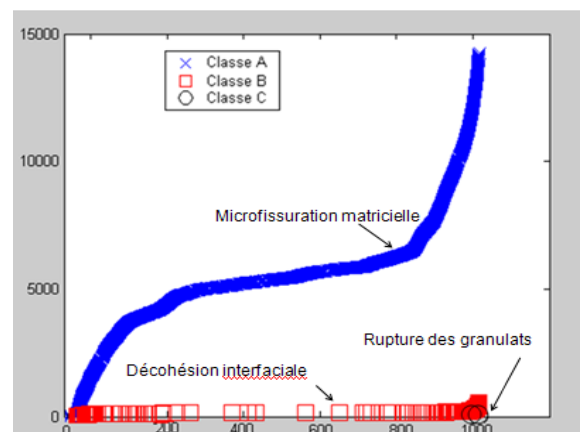


Figure 7 : Chronologie d'apparition de chacune des classes en fonction du temps

### 3.3 Corrélation entre fluage primaire et temps à rupture

En comparant la répartition temporelle de l'émission acoustique du matériau avec les différentes phases du fluage, nous avons constaté une certaine corrélation. Lors de nos essais, le temps de rupture relatif à chaque éprouvette varie considérablement, alors que la contrainte appliquée reste la même. Cela montre l'impossibilité de prévoir le temps de rupture du matériau en utilisant une relation empirique entre la contrainte appliquée et le temps de rupture. Cela nous a amené à chercher une corrélation entre les paramètres du fluage primaires et le temps de la rupture. Le résultat obtenu de cette recherche est montré sur les figures 8 et 9. La figure 8 présente le temps de transition  $t_m$  correspondant au minimum d'activité acoustique et la figure 9 donne la corrélation entre le temps de transition  $t_m$  et le temps de rupture  $t_c$  de l'éprouvette. L'expression de cette relation est donnée par l'équation (1):

$$t_c = 1,68t_m + 29,35 \quad (1)$$

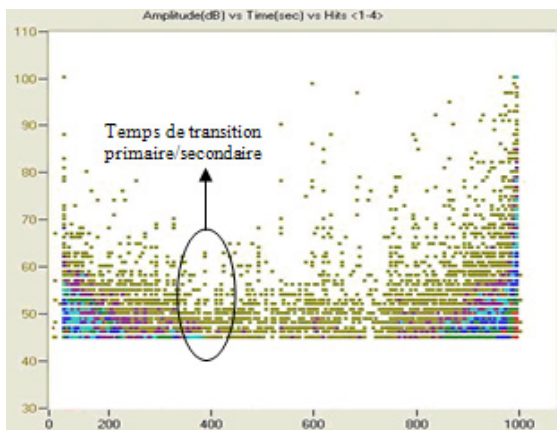


Figure 8 : Activité acoustique, distribution en amplitude : Temps de transition primaire/secondaire

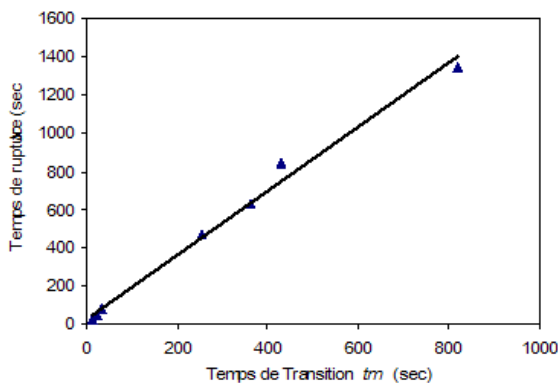


Figure 9 :Corrélation entre la durée du fluage primaire  $t_m$  et le temps à rupture  $t_c$ .

Cette corrélation déjà mis en évidence sur des composites matrice polymère fibre de verre [3] semble être universelle. Elle est très importante car elle suggère une possibilité d'estimation du temps de rupture en suivant l'évolution du taux des salves acoustiques émises durant le fluage et notamment en repérant la transition primaire-secondaire correspondant à un minium d'activité acoustique.

## 4 Conclusion

L'objectif de ce travail était d'analyser l'endommagement et la rupture des matériaux granulaires à base polymère sollicités en fluage en utilisant l'émission acoustique. Une analyse statistique multivariable des signaux collectés a été effectuée au cours des essais de fluage par une méthode de classification, composée de la méthode de coalescence floue et d'une ACP. Cette méthode nous a permis d'identifier trois classes de signaux correspondant aux signatures acoustiques de trois types d'endommagement (la fissuration matricielle, la décohésion interfaciale et la rupture des agrégats) et leur chronologie d'apparition pendant l'essai. Une assez bonne similitude entre les évolutions des taux d'EA pendant le fluage primaire et le fluage tertiaire au voisinage de la rupture a été constatée. Ce qui a permis la mise en place d'une corrélation entre certains paramètres des fluages primaire et tertiaire, notamment entre le temps à rupture  $t_c$  et le temps de transition fluage primaire/secondaire  $t_m$ . Ce résultat important montre les liens entre les deux phases et permet d'envisager un moyen de prédiction de la rupture du matériau.

## Références

- [1] R.D. Browne, M. Adams, E.L.French, "Experience in the Use of Polymer Concrete in the Building and Construction Industry"; *Compte rendu du First International Congress on Polymers in Concrete*, Londres, (1975).
- [2] A. Blaga, J.J. Beaudoin, "Polymer Modified Concrete" *Division of Building Research, National Research Council Canada, Canadian Building Digest 241*, Ottawa, (1985).
- [3] H. Nechad, A. Helmstetter, R. El Guerjouma, and D. Ornette, "Andrade and Critical Time-to-Failure Laws in Fibre-Matrix Composites: Experiments and Model" *Journal of the Mechanics and Physics of solids*, Vol. 53, pp. 1099–1127, (2005).
- [4] H. Nechad, "Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante". *Thèse de doctorat. INSA de Lyon*, (2004).
- [5] A. Politi, S. Ciliberto, R. Scorretti, "Failure time in the fibre-bundle model with thermal noise and disorder ". *Phys. Rev. E* 66 (2), 026107/1-6, (2002).
- [6] A. Nielsen, "Acoustic Emission Source based on Pencil Lead Breaking." *The Danish Welding Institute Publication*, vol.80, pp.15, (1980).
- [7] J.C. Bezdek, "Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms." *Plenum Press, New-York*, (1981).
- [8] I.T. Jolliffe, "Principal Component Analysis". *Springer-Verlag*, (1986).
- [9] B. Dubuisson, "Diagnostic, intelligence artificielle et reconnaissance des formes". *Hermès Science Pub*, (2001).
- [10] E. Oja, "Neural networks, principal components, and subspaces". *International Journal of Neural Systems*, Vol.1, pp.61-68, (1989).