
Caractérisation de l'effet des granulats sur la fragilité du béton sous fluage

J. Saliba^{1,2}, F. Grondin², A. Loukili²

¹Université de Bordeaux, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M/GCE), 365 cours de la libération, 33405 Talence, France. Jacqueline.saliba@u-bordeaux.fr

²Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, Centrale Nantes, BP 92101, 44321 Nantes, Cedex3, France. Frederic.grondin@ec-nantes.fr; Ahmed.loukili@ec-nantes.fr

RÉSUMÉ. Le comportement à long terme des structures en béton est conditionné par la viscoélasticité de la pâte de ciment et l'évolution des fissures. La prédiction des déformations différées est donc primordiale pour l'étude de l'aptitude à la fonctionnalité pérenne des structures. Une investigation expérimentale est proposée ici pour étudier l'effet des granulats sur l'évolution des propriétés de rupture du béton sous fluage. Pour cela, des essais de fluage propre ont été menés sur des poutres en béton et en mortier avec de fort niveau de chargement. L'influence du fluage sur la résistance résiduelle et l'énergie de fissuration a été étudiée en soumettant à la rupture les poutres chargées préalablement en fluage de flexion. En parallèle, la technique d'émission acoustique (EA) a été exploitée afin de suivre l'évolution de l'endommagement. Afin d'avoir plus d'informations sur l'effet de l'hétérogénéité du béton, des essais de fluage de dessiccation ont été aussi réalisés avec un suivi continu par la technique d'EA. Les résultats montrent que les granulats jouent alors un rôle important dans le développement des microfissurations et augmentent ainsi le risque de rupture sous fluage.

ABSTRACT. In order to design reliable concrete structures, prediction of long term behaviour of concrete and coupling between creep and damage is important. The objective of this paper is to study the effect of aggregate on the evolution of fracture properties of concrete under creep. To achieve this, an experimental investigation is proposed on mortar and concrete beams loaded with flexural creep at high stress levels. The influence of creep on the residual capacity and the fracture energy is studied by submitting the beams loaded with creep to rupture. Damage evolution is assessed by using the acoustic emission (AE) technique. In order to have more information on the effect of concrete heterogeneity, desiccation creep test were also realised and monitored with the AE technique. The results show that the aggregates increase the risk of rupture under desiccation creep due to different mechanisms of stress concentration and redistribution at the matrixó aggregate interface.

MOTS-CLÉS : mortier, béton, fluage, émission acoustique, endommagement.

KEYWORDS: mortar, concrete, creep, acoustic emission, damage.

1. Introduction

Le comportement à long terme des structures en béton est conditionné par la viscoélasticité de la pâte de ciment et l'évolution des fissures. La prédiction des déformations différées est donc primordiale pour l'étude de l'aptitude à la fonctionnalité pérenne des structures soumis à des taux de chargement élevés.

Le béton peut être représenté par trois phases : la pâte de ciment, les granulats et l'auréole de transition à l'interface pâte-granulats. Afin de mieux comprendre le processus de propagation des fissures, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'effet des inclusions (quantité, qualité de l'interface) [CHE 04; GUI 02]. Les caractéristiques microstructurales des granulats, leur granulométrie et la qualité des grains influencent aussi l'évolution du fluage en influençant la raideur, la porosité à l'interface pâte-granulats et le développement des microfissurations [BEL 97]. Une investigation expérimentale est proposée ici pour étudier l'effet des granulats sur l'évolution des propriétés à la rupture du béton sous fluage. Des essais de fluage propre ont été menés sur des poutres de béton et de mortier dérivé pour mieux comprendre la réponse de la matrice. L'influence du fluage sur la résistance résiduelle et l'énergie de fissuration a été étudiée en soumettant les poutres chargées préalablement en fluage de flexion à 70 % et 85 % de la force maximale (F_{max}) à la rupture. En parallèle, la technique d'émission acoustique (EA) a été exploitée afin de suivre l'évolution de l'endommagement. Cette dernière est une méthode de contrôle non-destructif de plus en plus utilisée dans l'exploitation et la mesure des évolutions liées aux phénomènes structuraux et qui s'est révélée très pertinente pour l'étude des phénomènes microstructuraux [OTS 00 ; GRA 06]. L'EA est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant de micro-déplacements locaux internes au matériau. Cette méthode permet de localiser d'éventuelles microfissures naissantes avec un suivi continu de l'endommagement en fonction du temps. Dans un premier temps, l'évolution de l'endommagement est suivie pendant les essais de rupture en flexion trois points, afin de comparer le comportement à la rupture des poutres de béton et de mortier (soumises à différents niveaux de chargement). Afin d'avoir plus d'informations sur l'effet de l'hétérogénéité du béton, des essais de fluage de dessiccation ont été aussi réalisés avec un suivi continu par la technique d'EA. La dégradation des caractéristiques mécaniques du béton pendant le fluage de dessiccation a été évaluée par la suite en soumettant des poutres chargées à 50% de F_{max} à la rupture

Dans la première partie de cet article, les conditions d'essais et les matériaux testés sont présentés. Puis, les résultats globaux sur le fluage et les courbes de rupture du mortier et du béton sont analysés. Enfin, le suivi des essais de fluage de dessiccation à l'aide de la technique d'EA est exploité.

2. Programme expérimental

2.1 Matériaux et propriétés mécaniques du béton

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). Cette formulation est caractérisée par un rapport eau/ciment de 0,56 et un affaissement du béton de 70 mm. La composition du mortier dérive de celle du béton. Tous les granulats (5/12,5 mm) sont remplacés par une masse égale de sable tout en conservant le même rapport E/C.

Constituants	Dosage béton (Kg/m ³)	Dosage mortier (Kg/m ³)
Granulat: 5/12,5 mm	936,0	-
Sable: 0/5 mm	780,0	1270,0
Ciment: CEMII 42,5	350,0	550,0
Eau	219,5	330,0
Superplastifiant: Glenium	1,9	-

Tableau 1. Formule du béton et du mortier testés.

La résistance à la compression (f_c), la résistance à la traction (f_t) et le module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) sont mesurés sur des éprouvettes cylindriques 110 x 220 mm² à 28 jours et sont égales à 42,6 MPa, 3,7 MPa, et 39 GPa respectivement. Ces valeurs correspondent à la moyenne des tests réalisés sur trois échantillons.

2.2 Essais de flexion trois points

Les essais de rupture et de fluage en flexion sont menés sur des poutres entaillées âgées de deux mois de dimensions $100 \times 200 \times 800 \text{ mm}^3$ avec une profondeur d'entaille de 0,2 % de la hauteur de la poutre. Les essais de rupture sont réalisés avec une presse Instron de capacité 160 kN. Le chargement est piloté par l'ouverture d'entaille (CMOD), avec une vitesse constante de $0,3 \mu\text{m/s}$ selon les recommandations de la RILEM [HIL, 85 ; RIL, 85]. La flèche est mesurée au milieu de la poutre à l'aide d'un capteur laser (sans contact). Les essais de fluage propre sont réalisés à 70% et 85% de la capacité maximale sur des bancs de fluage en flexion, dans une salle régulée en température à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 2^\circ\text{C}$) et en hygrométrie à 50 % ($\pm 5\%$).

2.3 La technique d'émission acoustique

Le dispositif d'acquisition et de traitement des signaux d'émissions acoustiques est constitué d'un système d'acquisition MISTRAS huit voies. Quatre capteurs piézoélectriques sont placés sur une face de la poutre autour de la zone de propagation de la fissure sous forme d'une maille de localisation rectangulaire ($12 \times 12 \text{ cm}^2$) (Figure 1). Ils sont positionnés sur les éprouvettes avec une faible couche de graisse silicone chassée d'air.

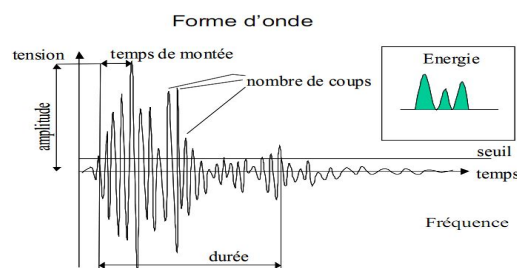
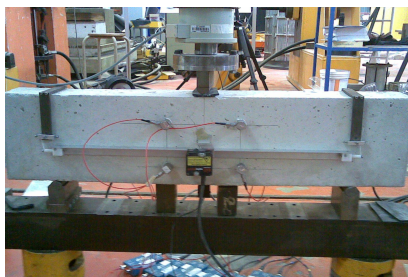


Figure 1. a) Géométrie de la poutre et position des capteurs b) représentation d'une salve.

Cette technique permet d'assurer une bonne transmission des signaux qui sont amplifiés avec un gain de 40 dB. Un seuil de détection de 35 dB a été choisi pour filtrer le bruit de fond. La précision de localisation mesurée est de l'ordre de 5 mm. L'acquisition est validée avant chaque essai en utilisant la source HSU-NIELSEN (Norme NF EN 1330). Cette procédure permet d'estimer d'une part la vitesse de propagation qui est de 3800 m/s et d'autre part l'atténuation des ondes acoustiques dans le matériau.

3. Influence du fluage sur le comportement à la rupture du mortier et du béton

Le fluage est défini comme étant la différence entre la flèche totale sous charge et la flèche élastique instantanée. La figure 2 (a) présente les courbes de fluage propre pour les poutres de béton (BF) et de mortier (MF) obtenues pour deux niveaux de chargement à 70 % et 85 % de F_{max} en flexion. Le fluage propre se développe très rapidement pendant les premiers jours du chargement (phase primaire) et se stabilise par la suite (phase secondaire). 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 [ROS, 94 ; BAZ, 92]. Le déplacement de fluage propre du mortier est plus important que celui du béton avec une cinétique de fluage supérieure surtout au niveau du fluage primaire. Cette différence est due à la présence des granulats dans le béton qui restreignent les déformations de fluage. En effet, les granulats ont un comportement élastique linéaire et ne fluent pas. La déformation rapportée au volume total est ainsi réduite avec la diminution du volume relatif de la pâte. Par ailleurs, le transfert progressif de la charge de la pâte vers les granulats joue aussi un rôle dans l'évolution de la déformation différée ultérieure.

Afin d'évaluer l'impact de la charge soutenue sur la dégradation du béton, des essais de rupture en flexion trois points ont été menés sur les poutres sollicitées en fluage et des poutres conservées dans les mêmes conditions, mais non-chargées en fluage (BV, MV). La figure 2 (b) présente les courbes force-CMOD obtenues avec l'essai de flexion trois points pour les poutres de mortier et de béton. Ces courbes présentent les mêmes phases mais avec une phase élastique plus importante et une résistance à la rupture et un module d'Young plus faible pour les poutres de mortier. Ceci est dû à la présence des granulats qui ont un module d'élasticité supérieur à celui de la matrice. L'énergie de fissuration calculée à partir de l'aire au-dessous de la courbe force-flèche est aussi moins importante pour le mortier. Ceci veut dire que la résistance à l'ouverture de la fissure est plus importante pour le béton à cause des granulats qui agissent comme des barrières face à la propagation des fissures.

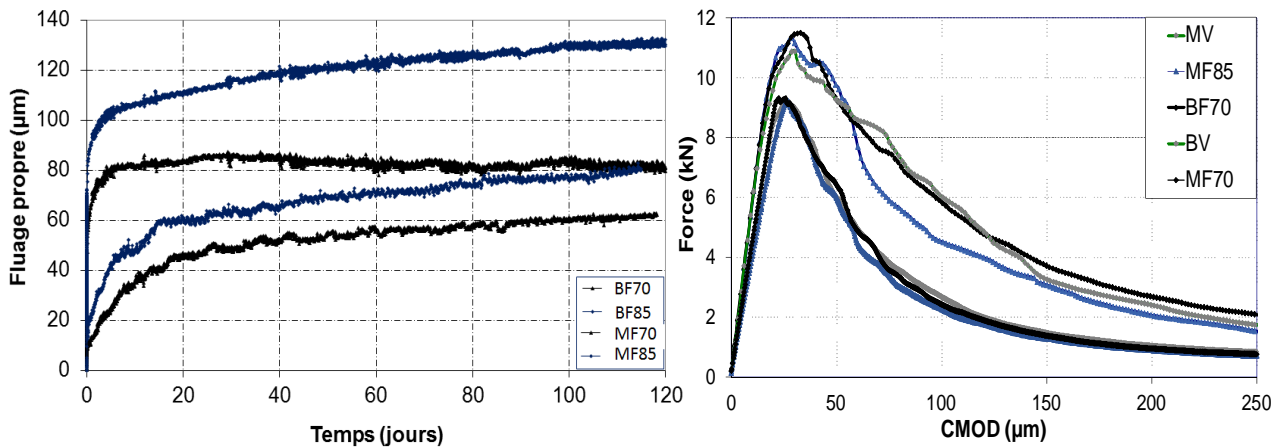


Figure 2. a) Fluage propre des poutres de béton et de mortier et b) Comportement à la rupture à partir des courbes force-CMOD des poutres non chargées et les poutres ayant subi du fluage à 70 % et 85 % F_{max} .

L'influence du fluage propre sur les paramètres de rupture des poutres de béton et de mortier n'est pas distinctement observée par ces essais mécaniques. L'exploitation de la technique d'EA pendant les différentes phases de rupture a montré une grande finesse dans la comparaison. Les résultats de Saliba et al. [Sal 12] ont ainsi montré une activité acoustique plus importante dans les poutres de béton soumises au fluage avec une largeur de la zone d'élaboration moins importante indiquant un comportement à la rupture plus fragile.

4. Fluage de dessiccation

Même avec les forts niveaux de chargement, aucune rupture n'a été observée pendant le fluage propre. Ceci est peut-être dû à une durée insuffisante des essais qui ne permet pas un endommagement important compte tenu d'une cinétique lente de l'évolution des fissures. Afin d'approfondir notre connaissance sur le couplage fluage-endommagement sur du long terme et de mieux évaluer l'effet de l'hétérogénéité, nous avons décidé de réaliser des essais de fluage en dessiccation sur des éprouvettes de béton (BFD) et de mortier (MFD) toujours à 70% et 85% de F_{max} en accélérant ainsi la cinétique de fluage (figure 3). A ce niveau, une nouvelle problématique se pose concernant l'effet de la dessiccation qui affecte la fissuration et les propriétés mécaniques [BIS 02]. Pour les deux niveaux de chargement, la cinétique de fluage est très rapide en comparaison avec le fluage propre observé précédemment. Le taux de chargement conditionne la durée de vie des poutres. La poutre de béton chargée à 85% s'est rompue après quelques heures, tandis que la rupture de la poutre chargée à 70% est survenue après quelques jours. Les courbes de fluage du béton révèlent ainsi un processus en trois phases: un fluage primaire caractérisé par une décroissance rapide de la vitesse de déformation, un fluage secondaire correspondant à un état stationnaire pour lequel la vitesse de déformation est pratiquement constante, et un fluage tertiaire caractérisé par une augmentation très rapide de la vitesse de déformation. Les forts niveaux de contraintes génèrent ainsi une fissuration du matériau dont la progression modifie de manière significative le taux de fluage et notamment dans sa dernière phase [SMA 87]. Par ailleurs, l'accélération positive dans cette phase ultime s'associe à un mécanisme de déformations dilatantes du béton et une croissance rapide de la micro-fissuration. La comparaison des courbes du fluage de dessiccation du béton et du mortier montre un caractère visqueux plus important des poutres de mortier avec un taux de fluage largement supérieur sans atteindre la rupture même après plusieurs mois de chargement.

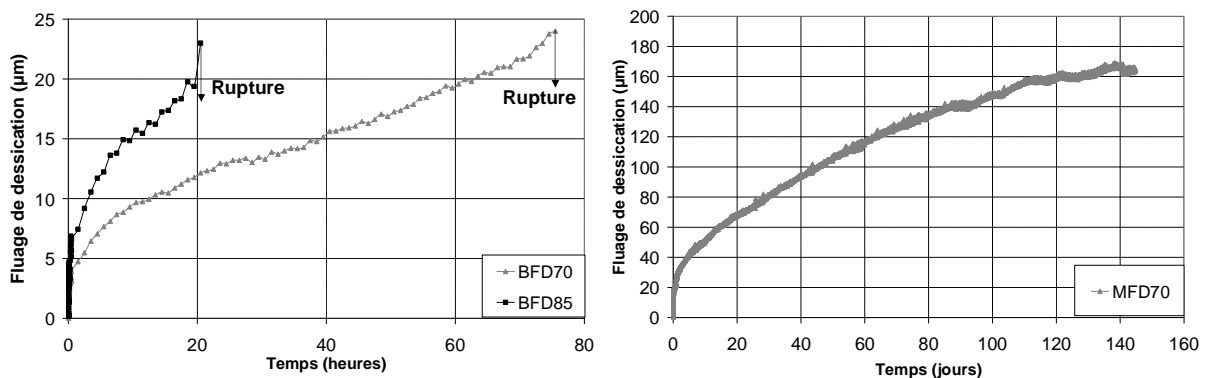


Figure 3. Fluage de dessiccation des poutres (a) de béton et (b) de mortier chargées en fluage

L'hétérogénéité du béton semble jouer un rôle important sur la tenue de la poutre. En effet, la présence des granulats dans le béton induit, d'une part, la présence d'une auréole de transition pâte-granat et, d'autre part, des zones de concentration de contraintes plus importantes accentuées par les incompatibilités de déformation entre les granulats et la pâte de ciment qui conduisent à la rupture [ZHE 05].

Afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu et l'effet de l'hétérogénéité du matériau, les essais de rupture en flexion trois points et les essais de fluage de dessiccation des poutres de béton et de mortier ont été suivis à l'aide de la technique d'EA.

5. Suivi du comportement à la rupture des poutres de béton et de mortier par l'EA

La carte de localisation des événements acoustiques des deux matériaux est comparée pour suivre l'évolution de la fissuration (figure 4). Dans le cas du mortier, les événements n'apparaissent qu'après le pic, tandis que les événements dans le béton apparaissent dans la partie non linéaire. Le schéma de propagation de la fissure est plus tortueux dans le béton dû à la présence des granulats avec des événements plus dispersés. La largeur de la zone de élaboration ainsi mesurée est plus petite dans le mortier, indiquant un comportement à la rupture plus fragile du mortier à cause de la diminution des mécanismes d'adoucissement.

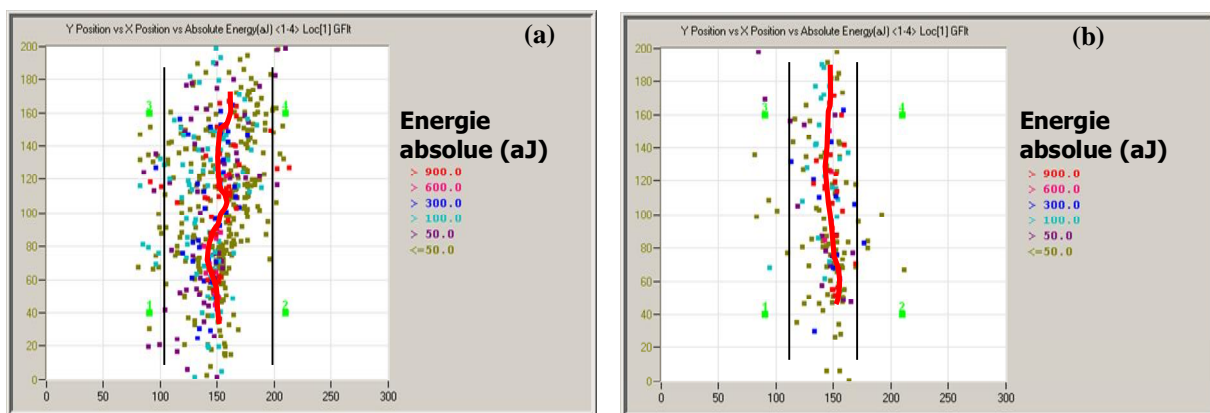


Figure 4. Plan des sources d'EA localisées dans les poutres de béton (a) et de mortier (b) à la fin de l'essai de rupture.

La figure 5 présente les évolutions des courbes force-CMOD en corrélation avec les amplitudes des signaux enregistrés dans le mortier et dans le béton. L'évolution des signatures acoustiques pendant les quatre phases indique des mécanismes différents. Pendant la phase élastique, l'activité au cours du chargement pour le mortier est négligeable en comparaison avec le béton. Quelques signaux de faible amplitude apparaissent dans le mortier dans la phase non-linéaire mais en nombre toujours très inférieur à celui du béton.

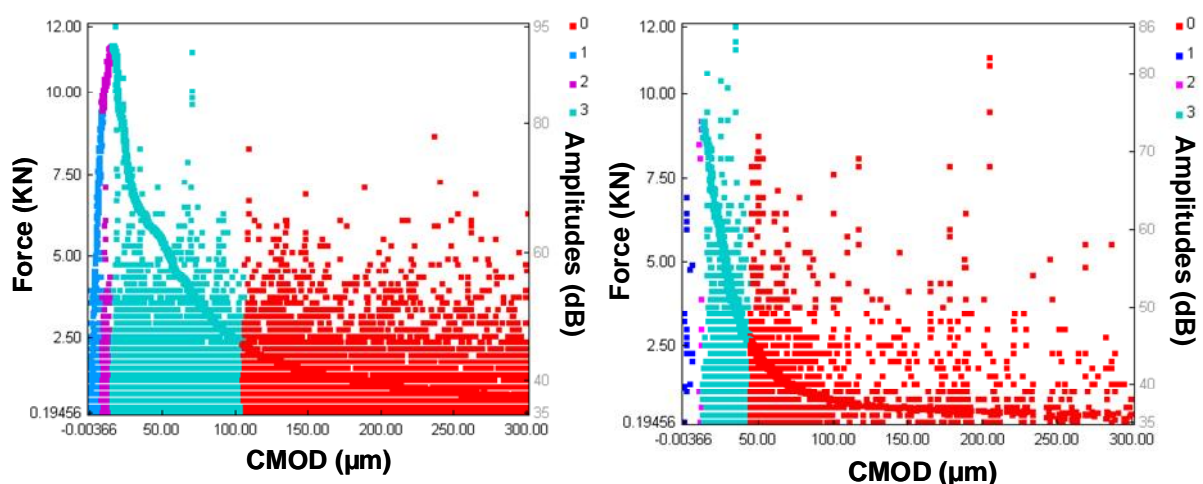


Figure 5. Corrélation entre les courbes force-CMOD et les amplitudes des signaux acoustiques dans les quatre phases pour les poutres de béton (a) et de mortier (b).

Cette différence entre l'activité acoustique des deux matériaux indique un mécanisme additionnel dans les poutres de béton. En effet, ces signaux de faible amplitude avant le pic peuvent être associés aux microfissurations à l'interface pâte-granulats considérée comme la zone la plus faible dans le béton [SAL 12]. Pendant la troisième phase, le nombre d'évènements augmente dans les deux matériaux avec une émission de signaux de fortes amplitudes indiquant la création et la propagation de la macro fissure.

A noter ici que l'énergie acoustique globale libérée avec les poutres de béton est plus importante que celle du mortier en corrélation avec l'énergie de rupture. Ceci est dû aux mécanismes d'adoucissement qui nécessitent une absorption additionnelle d'énergie [LAN 99]. En effet, les granulats peuvent changer l'orientation ou le chemin de propagation de la fissure dans la matrice et par suite créer une zone de microfissuration plus grande.

6. Suivi de l'endommagement durant le fluage de dessiccation par l'EA

Pour distinguer l'activité acoustique dans la matrice et vérifier l'effet des granulats, les essais de fluage de dessiccation sur mortier et sur béton sont analysés à l'aide de la technique d'EA. Une analyse plus approfondie pour la localisation de l'endommagement a été réalisée en 3D en augmentant le nombre des capteurs piézo-électriques à 8. La poutre de béton est suivie jusqu'à la rupture (3 jours) tandis que la poutre de mortier est suivie pendant 46 jours et ceci pour un niveau de chargement de 70% de F_{max} . La figure 6 présente l'évolution de l'amplitude et de l'énergie cumulée des signaux enregistrés au cours des essais. Les résultats montrent une proportionnalité entre le taux de fluage et l'activité acoustique en termes de nombre d'évènement et une corrélation avec les différents paramètres des signaux. L'activité acoustique peut ainsi se décomposer selon les trois phases d'évolution de la déformation. Ces phases engendrent des signaux d'amplitudes variées, correspondant visiblement à plusieurs mécanismes d'endommagement. L'activité acoustique est importante pendant la première phase, puis elle diminue progressivement avec l'accélération négative du taux de déformation pendant le fluage primaire. Pendant la deuxième phase, le taux de génération des microfissures diminue et l'activité acoustique est plus stable. Pour la poutre de mortier, le même comportement a été observé pendant le fluage primaire et secondaire.

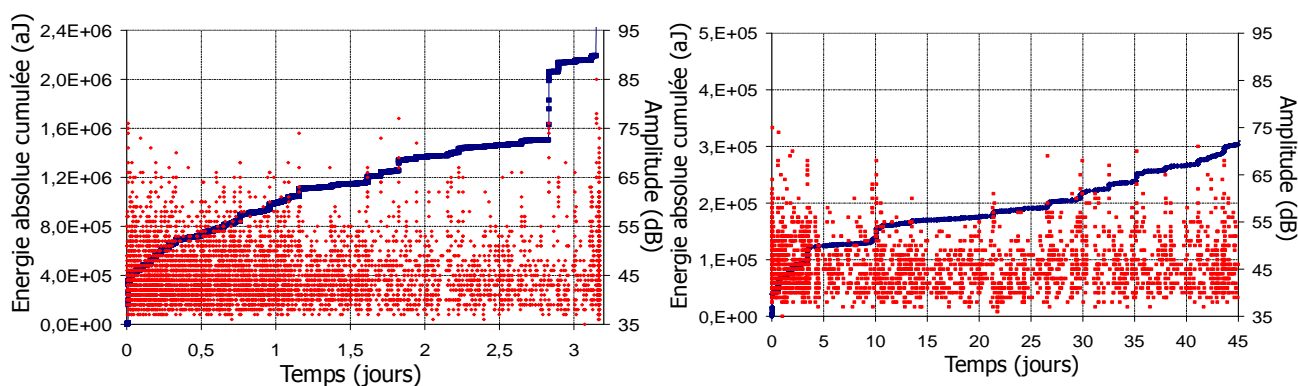


Figure 6. *Activité acoustique au cours de l'essai de fluage de dessiccation des poutres de béton (a) et de mortier (b) chargées à 70% de F_{max} : Corrélation entre l'énergie cumulée et les amplitudes des signaux.*

Pendant le fluage tertiaire de la poutre de béton, l'endommagement se localise et la densité des microfissures dépasse une certaine valeur critique. Durant cette dernière phase, très courte, l'activité acoustique redevient importante et très énergétiquement et nous détectons des signaux avec des amplitudes proches de 100 dB. Cette phase correspond à la propagation rapide des microfissures, générant des contraintes locales importantes, et la propagation d'une macro-fissure entraînant la rupture de l'éprouvette de béton au bout de trois jours. L'activité acoustique dans cette phase engendre des signaux couvrant toutes les gammes d'amplitudes, correspondant visiblement à plusieurs mécanismes d'endommagement (fissuration de la matrice, rupture des granulats, frottement, ...).

En analysant les énergies, les amplitudes et la carte de localisation des évènements acoustiques émis pendant le fluage de dessiccation, on observe que le taux d'activité acoustique est plus important dans le béton en comparaison avec le mortier indiquant un niveau d'endommagement plus élevé. Ceci est en accord avec les essais de rupture en flexion trois points, où l'activité acoustique dans le mortier est très faible en phase pré-pic et pendant tout l'essai par rapport aux poutres de béton. Les signaux de fortes amplitudes sont aussi

globalement plus faibles. De plus, les signaux de faibles amplitudes sont beaucoup moins importants et semblent correspondre ainsi à la fissuration aux interfaces pâte-granulats dans le béton. A noter ici que les évènements de fortes énergies sont surtout localisés au niveau de la surface à cause du gradient de séchage ajoutant ainsi des contraintes de traction en peau qui se superposent à celles dues à la flexion.

Ces résultats montrent une importante libération d'énergie libérée, indicateur de la propagation de la fissure, pendant le fluage de dessiccation et une plus grande sensibilité de l'endommagement au fluage de dessiccation surtout dans le béton. Les granulats jouent alors un rôle important dans le développement des microfissurations au niveau de la zone de transition en augmentant ainsi le risque de rupture sous fluage. Ces microfissurations sont probablement dues au gradient de déformations (dues au fluage et au retrait) et aux concentrations de contraintes entre la pâte et les granulats [BIS 02] et augmentent à la fois avec le séchage, le diamètre et le volume des granulats [WON 09]. La localisation des microfissures à ces interfaces conditionne alors le comportement sous fluage du béton et peut-être responsable d'une certaine fragilité à la rupture.

7. Effet du fluage de dessiccation sur le comportement à la rupture du béton

Afin de mieux caractériser l'effet du fluage de dessiccation sur l'évolution des propriétés de rupture, des essais de fluage de dessiccation ont été réalisés avec une charge de 50% de F_{max} (pour éviter la rupture rapide des poutres) (figure 7 (a)). Le fluage de dessiccation est significatif par rapport au fluage propre à 50% de chargement. Lorsque la poutre chargée au fluage propre pendant un mois est soumise au séchage, le déplacement augmente très rapidement au début et après quelques semaines, la déformation de fluage de la poutre soumise à l'effet combiné rejoint celle de la poutre soumise à la dessiccation totale.

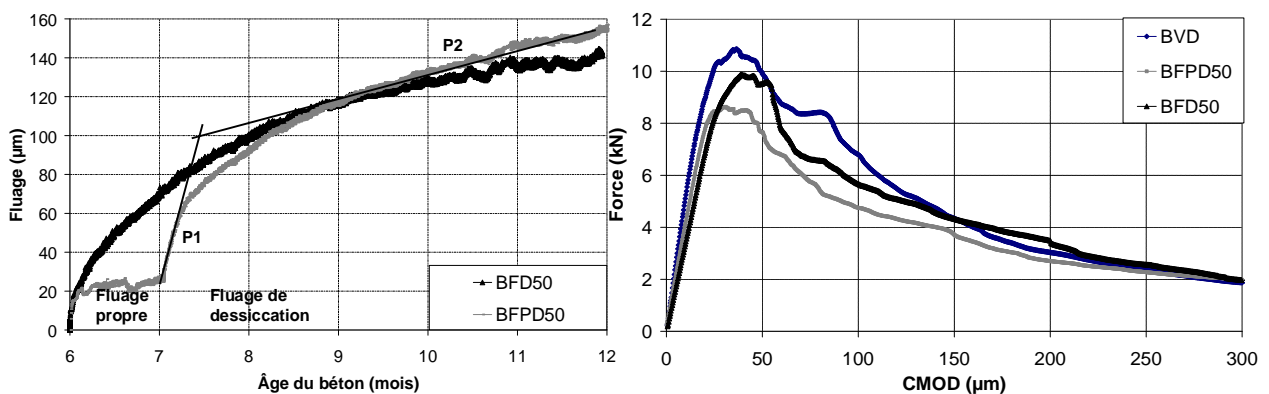


Figure 7. Fluage de dessiccation des poutres chargées à 50% de F_{max} (a) et courbes force-CMOD (b).

Des essais de rupture en flexion trois points ont été alors réalisés sur ces poutres et sur des poutres de béton non chargées soumises aux mêmes conditions de séchage (BVD) (figure 7 (b)). La résistance des poutres non chargées ne semble pas être affectée par la dessiccation, mais une légère diminution du module d'Young est observée due au retrait empêché par les granulats. Ceci est en accord avec les études réalisées sur l'effet de la dessiccation [BUR 05]. Par contre, une diminution nette de la résistance résiduelle, du module d'Young et de l'énergie de fissuration est observée sur les poutres soumises au fluage indiquant un endommagement important. Donc, même avec un niveau de chargement relativement faible, le couplage fluage-endommagement est plus prépondérant en dessiccation qu'en fluage propre. En effet, après six mois de chargement, le déplacement total en fluage de dessiccation atteint des valeurs importantes (supérieures à celles du fluage propre et du fluage de dessiccation à 70% et 85% de chargement) sans atteindre la rupture indiquant qu'il y a aussi d'autres mécanismes à l'échelle de la microstructure responsables de la rupture.

8. Conclusion

Ce travail permet d'analyser l'effet des granulats sur le comportement à la rupture des poutres sollicitées en fluage de flexion. Les résultats montrent que la technique d'ÉA est une méthode très pertinente pour observer la localisation des fissures. Les essais de rupture montrent que les poutres de mortier développent une énergie de rupture moins importante et présentent une largeur de la zone d'élaboration moins large avec un schéma de propagation de la fissure moins tortueux. Le suivi des essais de fluage de dessiccation montre une

proportionnalité entre la déformation de fluage et l'activité acoustique avec un comportement différent pendant les différentes phases de fluage (primaire, secondaire et tertiaire). L'activité acoustique est plus importante pour les poutres de béton indiquant un endommagement plus important. Le couplage fluage-endommagement semble être plus sensible à la dessiccation dû aux microfissurations générées par les incompatibilités de déformations entre la pâte et les granulats et aux concentrations et de redistribution de contraintes qui conduisent à la rupture des poutres en béton.

9. 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.

10. Références

- [BAZ 92] Bazant Z.P., Gettu R., « Rate effects and load relaxation in static fracture of concrete », *ACI Materials Journal*, Vol.89, N°5, 1992, p.456-468.
- [BEL 97] Belarbi N., Pons G., Perrin B., « Delayed behaviour of concrete: influence of additions and aggregate characteristics in relation to moisture variations », *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n°9, 1997, p.1429-1438.
- [BIS 02] Bisschop J., van Mier J.G.M., « How to study drying shrinkage microcracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy? », *Cement and Concrete Research*, Vol.32, 2002, p.279-287.
- [BUR 05] Burlion N., Bourgeois F., Shao J-F., « Effects of desiccation on mechanical behaviour of concrete », *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, 2005, p. 367-379.
- [CHE 04] Chen B., Liu J., « Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete », *Construction and Building Materials*, vol.18, 2004, p. 585-590.
- [GRA 06] Granger S., Loukili A., Pijaudier-Cabot G., Chanvillard G., « Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis », *Cement and Concrete Research*, Vol.37, 2007, p.519-527.
- [GUI 02] Guinea G.V., El-Sayed K., Rocco C.G., Elices M., Planas J., « The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete », *Cement and Concrete Research*, vol.32, 2002, p. 1961-1970.
- [HIL 85] 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, p.291-296.
- [LAN 99] Landis E.N., « Micro-macro fracture relationships and acoustic emissions in concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 13, 1999, p. 65-72.
- [OTS 00] Otsuka K., Date H., « Fracture process zone in concrete tension specimen », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 65, 2000, p. 111-131.
- [RIL 85] 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, pp.285-290, 1985.
- [ROS 94] 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, p.510-514.
- [SAL 12] Saliba J., Loukili A., Grondin F., Regoin J-P., « Experimental study of creep-damage coupling in concrete by acoustic emission technique », *Materials and Structures*, Vol. 45, 2012, p.1389-1401.
- [SAL 13] Saliba J., Loukili A., Grondin F., Regoin J-P., « Identification of damage mechanisms in concrete under creep by the acoustic emission technique », *Materials and Structures*, DOI 10.1617/s11527-013-0113-6.
- [SMA 87] Smadi M.M., Slate F.O., Nilson A.H., « Shrinkage and creep of high-, medium-, and low-strength concretes, including overloads », *ACI Materials Journal*, vol. 84, n° 3, 1987, p. 224-234.
- [WON 09] Wong H.S., Zobel M., Buenfeld N.R., Zimmerman R.W., « The influence of the interfacial transition zone and microcracking on the diffusivity, permeability and sorptivity of cement-based materials after drying », *Magazine of Concrete Research*, vol. 61, 2009, p. 571-589.
- [ZHE 05] Zheng J.J., Li C.Q., Zhou X.Z., « Characterization of microstructure of interfacial transition zone in concrete », *ACI Materials Journal*, vol. 102, n° 4, 2005.