

# COMPORTEMENT À LA FATIGUE DE DALLES DE PONTS EN BÉTON ARMÉ DE BARRES EN MATÉRIAUX COMPOSITES DE PRFV

**B. Benmokrane, A. El-Ragaby et E. El-Salakawy**

Chaire de recherche du CRSNG sur les Matériaux composites de PRF innovateurs pour les infrastructures, Département de génie civil, Faculté de génie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec) J1K 2R1  
Tél : (819) 821-7758; Courriel: Brahim.Benmokrane@USherbrooke.ca

---

**Résumé :** Les dalles de ponts routiers sont soumises directement aux charges répétées de camions et de véhicules lourds et elles sont, par conséquent, plus susceptibles à une rupture par fatigue comparativement aux autres éléments structuraux d'un pont. Par ailleurs, l'armature en matériaux composites constitue une alternative à l'armature métallique afin de pallier au problème de corrosion et à la détérioration des structures en béton armé. L'étude expérimentale décrite dans ce manuscrit porte sur l'évaluation du comportement de dalles de ponts en béton armé d'armature en PRF de verre (PRFV) soumises à des charges concentrées répétées afin d'examiner la durée de vie en fatigue pour de tels éléments de ponts. Cette étude comprend également des dalles de ponts en béton armé d'acier pour des fins de comparaison. Cinq dalles de ponts (3000 mm de long x 2500 mm de large x 200 mm d'épaisseur) ont été testées sous charges cycliques jusqu'à rupture. Quatre dalles ont été armées avec des barres en PRFV et une dalle avec des barres en acier. Les dalles ont été supportées par deux poutres métalliques espacées de 2000 mm centre à centre et soumises à une charge concentrée cyclique sur une aire de contact de 600 mm x 250 mm afin de simuler une charge de camion conformément au Code canadien de calcul de ponts routiers (CSA-S6). Différents modes de chargement cyclique (ex., amplitude variable) sur les dalles jusqu'à rupture. Les résultats obtenus sont présentés en termes de déflexions, déformations dans le béton et l'armature, et largeurs de fissures pour différents paliers de chargement cyclique. Les résultats obtenus démontrent que les dalles de ponts en béton armé d'armature en PRFV de verre ont une meilleure performance en fatigue comparativement aux dalles en béton armé d'acier.

## INTRODUCTION

La performance en fatigue est un état limite important qui doit être considéré par les concepteurs de structures qui sont soumises à des chargements répétés ou cycliques, comme par exemple les ponts routiers. Les dalles de ponts routiers sont cependant soumises directement aux charges répétées de camions et de véhicules lourds et elles sont, par conséquent, plus susceptibles à une rupture par fatigue comparativement aux autres éléments structuraux d'un pont. Par ailleurs, l'armature en matériaux composites de polymères renforcés de fibres (PRF) constitue une alternative à l'armature métallique afin de pallier au problème de corrosion et à la détérioration des structures en béton armé. Aussi, les barres d'armature en matériaux composites de PRF possèdent une résistance en traction élevée (environ 2 à 6 fois la limite élastique de l'acier d'armature passive), ce qui leur permet de constituer un renforcement structural attrayant pour les structures en béton. Le comportement d'éléments structuraux en béton armé de barres en PRF est différent de ceux en béton armé de barres d'acier. En effet, les barres en PRF possèdent un module d'élasticité relativement plus faible que celui de l'acier et ont des propriétés d'adhérence différentes de celles des barres d'acier (ACI 440.1R-03). À titre d'exemple le module d'élasticité longitudinal des barres d'armature en matériaux composites de fibres de verre (PRFV) varie entre 40 et 50 GPa, ce

qui correspond à 20 et 25% de celles en acier (200 GPa). Le module d'élasticité des barres d'armature en matériaux composites de fibres de carbone varie, quant à lui, entre 90 et 140 GPa. Ainsi, on peut noter que la valeur du module d'élasticité des barres en PRFV est plutôt plus proche de celle du module d'élasticité du béton.

La durée de vie des dalles de tablier de pont en béton armé contrôlée par sa résistance à la fatigue ainsi que la durabilité des matériaux utilisés. Par conséquent, il est nécessaire de comprendre le comportement en fatigue de telles structures spécialement quand on utilise de nouveaux matériaux de renforcement comme les barres d'armature en matériaux composites de fibre de verre (PRFV). La recherche décrite dans ce manuscrit a été conçue en vue d'évaluer le comportement de dalles de ponts en béton armé d'armature en PRF de verre (PRFV) soumises à des charges concentrées répétées afin d'examiner la durée de vie en fatigue.

## **ÉTAT DE CONNAISSANCES**

Pendant les chargements répétés de fatigue, la structure subit des déformations locales et globales, qui mènent à une redistribution des contraintes. Les propriétés de fatigue des éléments en béton armé sont reliées aux matériaux qui les constituent, le béton et l'armature (acier ou PRF). En particulier, sous chargements cycliques, une dalle de tablier de pont en béton armé peut être affectée par la résistance des matériaux et les propriétés d'adhérence entre le béton et l'armature. L'adhérence peut être un facteur critique pour la durée de vie en fatigue de telles structures.

### **Comportement à la fatigue du béton et des armatures en acier et en PRF**

Le béton n'est pas un matériau homogène et son comportement à la fatigue dérive d'un processus progressif d'initiation et de propagation de microfissures. Le mécanisme de fatigue dans le béton débute avec des microfissures préexistantes dans la matrice de ciment au contact avec les granulats. Sous sollicitations cycliques, le béton montre des déformations importantes en début de chargement. Ensuite suivront deux stades : un premier stade de stabilisation des déformations (ou taux d'augmentation constant) et un deuxième stade d'augmentation brutale des déformations conduisant à la rupture. À ce stade, le béton est intensément micro-fissuré et les déformations augmentent très significativement juste avant la rupture. Le module d'élasticité du béton diminue très significativement (Holman 1982; Hwan 1986).

Le comportement en fatigue d'armature d'acier peut être divisé en phase d'initiation de fissures, une phase de propagation de fissures stable et une facture brutale de la section d'armature. Les variations des caractéristiques de surface, telles que les crénelures et la rugosité des barres influencent fortement sur la résistance à la fatigue. Aussi, les soudures, la courbure des barres, et la corrosion favorisent l'initiation de fissures et mènent à une diminution de la résistance à la fatigue (Tilly and Moss 1982).

Les matériaux composites de PRF sont anisotropes et ceci a comme conséquence un comportement en fatigue plutôt complexe. Des mécanismes d'endommagement typiques observés dans les PRF soumis à des chargements cycliques (ou de fatigue) sont : fissuration de la matrice de résine, détachement (ou décohéson) des fibres de la matrice, augmentation du pourcentage de vide, et rupture de fibres.

### **Comportement à la fatigue de dalles de ponts en béton armé**

Plusieurs études en laboratoire ont été réalisées sur le comportement en fatigue de dalles de ponts en béton armé d'acier ou de PRF (ex. : Pardikaris and Beim 1988; Kumar and GangaRao 1998; Rahman et al. 2000; Matsui et al. 2001; Graddy et al. 2002; et Memon and

Mufti 2004).

Les résultats de ces recherches peuvent être résumés comme suit :

- L'endommagement des dalles de tabliers de ponts en béton armé causé par la charge cyclique de roue mobile est plus sévère que le dommage causé par une charge cyclique stationnaire. La durée de vie en fatigue des dalles de tabliers de pont en béton armé (armature isotrope) correspond à environ 20 fois celle des dalles armées avec un schéma d'armature ortho-tropique;
- Un réseau de fissuration radial est obtenu pour le chargement statique et le chargement cyclique à charge stationnaire. Un réseau de fissuration de type « grille » est observé pour les chargements cycliques à charge mobile.
- La durée de vie en fatigue des dalles de ponts en béton armé ayant des résistances statiques et des taux d'armature analogues augmente en fonction de la profondeur effective de la dalle. Aussi, il a été observé que les dalles avec armature en compression ont une durée de vie plus courte que celles ne contenant pas d'armature de compression.
- La durée de vie des dalles de ponts en béton armé de PRF est très comparable à celles armées en acier.

## **PROGRAMME EXPÉRIMENTAL**

### **Dalles d'essai**

Le programme expérimental comprend cinq dalles de tablier de pont en béton armé à grande échelle (2500 mm de largeur, 3000 mm de longueur, and 200 mm d'épaisseur). Quatre dalles étaient renforcées avec différents taux et configurations d'armature en PRFV et une dalle était renforcée avec des barres d'acier conventionnel pour fins de comparaison. Un enrobage de béton (inférieur et supérieur) de 38 mm est utilisé pour toutes les dalles.

L'armature transversale inférieure en PRFV pour les quatre dalles S1, S2, S3, et S4 a été déterminée en utilisant la méthode de calcul empirique recommandée par la version mise à jour de la Section 16 du CHBDC (Clause 16.8.7.1, (CSA 2006)). Selon cette Clause, une section minimale d'armature de PRF correspond à  $500d_s/E_{frp}$  où  $d_s$  est la profondeur effective. Cet approche donne une armature de 1#19 @ 150 mm dans la direction inférieure transversale avec un taux d'armature de 1,2%. L'armature longitudinale inférieure pour les quatre dalles consiste comporte des barres en PRFV de 1#16 @ 200 mm avec un taux d'armature de 0,6%.

Différents schémas et taux d'armature de PRFV ont été utilisés pour le lit d'armature supérieur. Pour les dalles S1, et S2, 1#16 @ 200 dans les deux directions avec un taux de d'armature de 0.6% Pour la dalle S3, un taux d'armature minimal de 0.3% a été utilisé dans les deux directions, qui donne e 1#13 @ 300 mm dans chaque direction. La dalle S4 n'a aucune armature supérieure.

Un taux d'armature isotrope de 0,3% a été utilisé pour la dalle en béton armé d'acier (Clause 8.18.4.2 du CHBDC (CSA 2000)). Ceci a résulté en 1#10M @ 210 mm. Les détails des 5 dalles d'essais sont donnés dans le Tableau 1.

### **Propriétés des matériaux**

#### **Béton**

Toutes les dalles ont été fabriquées en utilisant un béton ordinaire (béton de Type V, selon les spécifications du Ministère des Transport de Québec, MTQ) de résistance en compression de 37 MPa à 28 jours.. La composition d'un 1.0 m<sup>3</sup> de béton frais est constituée de: 1051 kg de gros granulats (10 à 20 mm), 672 kg d'agrégats fins, 430 kg de ciment Portland (type 10)

avec un rapport eau-ciment de 0,39, et 5 % d'air. Toutes les dalles ont été coulées et gardées à l'intérieur du laboratoire, pour au moins 14 jours, couvertes avec des toiles en plastique. Des recherches précédentes indiquaient que la fissuration affecte significativement le comportement en fatigue des dalles de tablier en béton (Hwan 1986; Azad et al. 1993). Une des caractéristiques de cette étude est que toutes les dalles d'essais, après la période de murissement de 14 jours en laboratoire, ont été conservées à l'extérieur du laboratoire dans des conditions environnementales naturelles pour au moins une année. Ceci a été fait pour simuler l'environnement que le pont subit et ainsi permettre la formation de fissures dans le béton provoquées essentiellement par les conditions environnementales (humidité, température, vent, etc.). Aussi, cette période de conservation aidait à stabiliser les propriétés mécaniques du béton (résistance en compression et module d'élasticité). Ces propriétés peuvent varier durant la période des essais de fatigue si le béton est testé après seulement une courte période de mûrissement.

Durant cette période de conservation à l'extérieur du laboratoire, les 5 dalles ont été exposées à plus de 25 cycles de gel-dégel (-35 to +35°C) et 20 cycles de mouillage-séchage comme montre la figure 1, dont les données ont été fournies par Environnement Canada. Les échantillons de béton pour les essais mécaniques (cylindres) ont été aussi conservés dans les mêmes conditions environnementales. Les résistances moyennes en compression et en traction déterminées lors des essais de fatigue correspondent à 41 and 3,9 MPa, respectivement.

### **Armature**

Deux types de barres ont été utilisées pour cette étude; des barres V-ROD™ de PRFV et des barres d'acier (CSA 400). Les barres V-ROD™ de PRFV (Pultrall Inc. 2004) sont fabriquées par la combinaison de la technique de fabrication de pultrusion et le processus de recouvrement en ligne de sable et résine pour la surface extérieure. Ces barres de PRFV sont fabriquées avec des fibres de verre de type E à haute résistance (73% de fibre par volume) et une résine vinyl ester modifiée. Les barres V-ROD™ de PRFV ont été utilisées comme armature principale pour plusieurs dalles de tabliers de ponts en Amérique du Nord (El-Salakawy et al. 2005; Benmokrane et al. 2006). Les propriétés mécaniques des barres de PRFV et d'acier ont été mesurées conformément aux normes d'essais (CAN/CSA-S806-02, ASTM A370-05). Le tableau 2 récapitule toutes les propriétés des matériaux utilisés dans cette étude

### **Procédure d'essai**

Les dalles ont été supportées par deux poutres métalliques espacées de 2000 mm centre à centre et soumises à une charge concentrée cyclique sur une aire de contact de 600 mm x 250 mm afin de simuler une charge de camion conformément au Code canadien de calcul de ponts routiers (CSA-S6). Différents modes de chargement cyclique (ex., amplitude variable) sur les dalles jusqu'à rupture. Les résultats obtenus sont présentés en termes de déflexions, déformations dans le béton et l'armature, et largeurs de fissures pour différents paliers de chargement cyclique. Les résultats obtenus démontrent que les dalles de ponts en béton armé d'armature en PRFV de verre ont une meilleure performance en fatigue comparativement aux dalles en béton armé d'acier.

Toutes les dalles ont été supportées par deux poutres métalliques espacées de 2000 mm centre à centre et ont été testées sous une charge concentrée cyclique (appliquée au centre de la dalle) via une plaque d'acier de 75 mm d'épaisseur et 250 × 600 mm d'aire de contact afin de simuler une charge de camion conformément au Code canadien de calcul de ponts routiers (CHBDC, CSA-S6). Une feuille de néoprène de 20-mm d'épaisseur est utilisée entre la

plaque d'acier et la surface du béton. Le montage d'essai utilisé est analogue à celui utilisé précédemment sur des dalles de ponts soumises à des charges statiques jusqu'à rupture (El-Gamal et al. 2005). En particulier, le montage expérimental comprend deux poutres métalliques de 3 m de long et trois diaphragmes en acier (membrures métallique en L) afin d'empêcher tout mouvement latéral et rotations des poutres. Un vérin de 500 kN de capacité et de +/- 250 mm d'amplitude, assisté par un ordinateur, a été utilisé pour appliquer les charges de fatigue. La Figure 2 montre le dispositif d'essai utilisé.

### **Chargement cyclique (fatigue)**

Les charges mobiles des véhicules sur un pont routier ont été simulées par une charge concentrée stationnaire cyclique et variable en magnitude. La Figure 3 illustre le type de chargement cyclique appliqué sur les dalles. La charge cyclique appliquée est de forme sinusoïdale et varie entre un niveau de charge minimale et des niveaux de charge maximale variable (Fig. 3). Le niveau de la charge minimale était fixé à 15 kN pour toutes les dalles pour prévenir tout effet d'impact durant le chargement cyclique et aussi représente l'effet des charges mortes (poids propre) sur les ponts routiers (chaussée, etc.). Différents niveaux de charge maximum correspondant à 183.8, 245.0, 367.5, and 490.0 kN ont été appliqués. Ces valeurs de charge équivalent respectivement à  $1.5P_{f/s}$ ,  $2P_{f/s}$ ,  $3P_{f/s}$ , et  $4P_{f/s}$ , où  $P_{f/s} = 87.5 \times 1.4 \times 1.0 = 122.5$  kN (selon le CHBDC, Article 3.5.1).  $P_{f/s}$  correspond à l'état de limite de fatigue. Chacun des paliers de charges cycliques (par exemple, 15 kN minimum et 183.75 kN maximum, ou 15 kN minimum et 245 kN maximum) a été appliqué pour 100,000 cycles à une fréquence de 2 Hz. Si la rupture de la dalle se produisait durant un palier de chargement cyclique, l'essai est arrêté. Si la dalle d'essai survit au quatre paliers de chargement cyclique, l'essai est poursuivi avec la palier de chargement maximum (15 – 490 kN) jusqu'à la rupture de la dalle. Cette procédure d'essai a été appliquée pour trois dalles renforcées avec des PRFV (S1, S4 et S5) et pour la dalle renforcée avec l'acier (S0).

Pour la dalle S3, 300,000 cycles supplémentaires ont été appliqués aux charges maximum, soit : 100,000 cycles aux charges maximum de 122.5, 153.125, et 214.375 kN. Ceci permet d'évaluer l'effet de chargement cyclique à des niveaux de charge maximum faibles.

Pour la dalle S2, 4,000,000 cycles de chargement entre 15 et 122.5 kN (correspondant à  $P_{f/s}$ ) ont été appliqués à une fréquence de chargement de 4 Hz (durée de l'essai d'environ 12 jours). Ce nombre de cycles (4,000,000) correspond à une valeur double de celui préconisé par plusieurs chercheurs pour évaluer la durée de vie en fatigue de dalles de ponts routiers (2,000,000 de cycles).

Avant l'application du programme d'essais de chargement cyclique prévu pour chacune des dalles, celles-ci ont tout d'abord étaient fissurées en effectuant un chargement monotone jusqu'à une charge de 183.8 kN (correspondant à  $1.5 P_{f/s}$ ). Ceci a permis de déterminer la charge de fissuration et aussi d'induire de la fissuration dans les dalles afin de simuler le cas des ponts réels. La rigidité flexionnelle initiale des dalles (avant l'application des charges cycliques) a aussi été déterminée. Cette valeur de rigidité flexionnelle a servi de comparaison à celles déterminées à la fin de chacun des paliers de chargement cyclique afin d'évaluer l'endommagement des dalles. Enfin, il est à noter que dû à la limitation des équipements disponibles dans le laboratoire, il a été nécessaire d'augmenter le niveau de charge minimale de 15 à 50 kN pour tous les paliers de chargement cyclique pour lesquels le niveau de charge maximale dépasse 400 kN.

### **Instrumentation des dalles**

Pour chaque dalle, vingt six jauges de déformation électriques ont été utilisées pour mesurer les déformations dans les barres d'armature et le béton. Six capteurs de déplacement linéaire

(LVDTs) ont été utilisés pour mesurer la flèche de la dalle à différents endroits. Aussi, un LVDT de haute précision ( $\pm 0,001$  mm) a été utilisé pour mesurer l'ouverture de fissure en fonction de la charge et du nombre de cycles appliqués (Figure 4). Un système d'acquisition de données, assisté par un ordinateur a été utilisé pour enregistrer les lectures de toutes les jauges de déformation, des LVDTs, et la charge appliquée durant le chargement cyclique.

## **RÉSULTATS DES ESSAIS**

Les résultats des séries d'essais effectuées sont présentés en termes de déflexions, déformations dans le béton et l'armature, et largeurs et propagation de fissures pour différents paliers de chargement cyclique. Les résultats obtenus sont illustrés dans les Figures 5 à 9. Ces résultats feront l'objet d'une présentation orale et de discussions lors du colloque.

## **CONCLUSIONS**

Cinq dalles de ponts (3000 mm de long x 2500 mm de large x 200 mm d'épaisseur) ont été testées sous charges cycliques jusqu'à rupture. Quatre dalles ont été armées avec des barres en PRFV et une dalle avec des barres en acier. Les résultats obtenus permettent les observations suivantes :

- 1- L'endommagement des dalles de tabliers de ponts soumises à des charges de fatigue (charges cycliques) peut être noté par l'endommagement cumulatif qui est observé par une augmentation des déflexions résiduelles et élastiques ainsi que par une augmentation des déformations dans le béton et les barres d'armature;
- 2- Toutes les dalles testées (PRFV et acier) ont rompu par poinçonnement;
- 3- Les dalles en béton armé avec des barres de PRFV ont montré une meilleure performance en fatigue comparativement à celle en béton armé d'acier. La durée de vie en fatigue serait environ 2,5 fois supérieure. Ceci peut être attribué à une certaine équivalence entre les modules d'élasticité du PRFV et du béton ainsi qu'au comportement linéaire des barres de PRFV jusqu'à la rupture. Cette équivalence entre les modules d'élasticité permet une meilleure distribution des déformations et des fissures sous charges cycliques;
- 4- Les essais de chargement cyclique correspondant au palier de charge maximum de 1,75 fois la charge de limite de fatigue n'ont engendré aucun endommagement significatif des dalles testées;
- 5- L'armature du lit supérieur a eu un très faible effet sur la performance en fatigue des dalles soumises à des chargements cycliques de chargement maximum inférieure à deux fois la charge de l'état limite de fatigue; cependant, cet effet devient plus important à des niveaux de charge maximum plus élevés;
- 6- Le taux d'armature (armature en PRFV) proposé dans le nouveau Code de la Section 16 du CHBDC (CAN/CSA-S6-06) est adéquat pour satisfaire les exigences en termes de résistance à la fatigue, d'états limites de service et de durée de la vie en fatigue pour les dalles de pont en béton armé de PRF.

## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs aimeraient remercier les organisations suivantes pour leurs contributions à cette étude: le ministère des Transports du Québec; Pultrall Inc., (Thetford Mines, Québec); le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (NSERC) et le Réseau Canadien de Centres d'Excellences sur les Innovations en Structures avec Systèmes de Détection Intégrés ISIS-Canada (Winnipeg, Manitoba). Aussi, les auteurs remercient Messieurs François Ntacorigira and Sébastien-Simon Sindyigaya, du Département de Génie Civil de l'Université de Sherbrooke pour leur aide technique.

## RÉFÉRENCES

- Adimi, M.R., Rahman, A.H., and Benmokrane, B. (2000). "New Method for Testing Fibre-Reinforced Polymer Rods under Fatigue." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 4(4), 206- 213.
- Azad, A.K., Baluch, M.H., Al-Mandil, M.Y., Sherif, A.M., and Kareem, K. (1993). "Loss of Punching Capacity of Bridge Deck Slabs from Crack Damage." *ACI Structural Journal*, 90(1), 37-41.
- Benmokrane, B. and El-Salakawy, E.F., editors (2002). "Durability of fiber reinforced polymer (FRP) composites for construction." *Proceeding of the Second International Conference*, Montreal, Quebec, Canada, 715 p.
- Benmokrane, B., El-Salakawy, E.F., El-Ragaby, A., and Lackey, T. (2006). "Designing and Testing of Concrete Bridge Decks Reinforced with Glass FRP Bars." *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 2, March/April, pp. 179-192.
- Canadian Standards Association (CSA). (2000). "Canadian highway bridge design code." *CAN/CSA-S6-00*, Toronto.
- Canadian Standards Association (CSA). (2002). "Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers." *CAN/CSA-S806-02*, Toronto.
- Canadian Standards Association (CSA). (2006). "Canadian highway bridge design code-Section 16, updated version for public review." *CAN/CSA-S6-06*, Toronto.
- Demers, C.E. (1998). "Fatigue Strength Degradation of E-glass FRP Composites and Carbon FRP Composites." *Journal of Construction and Building Materials*, (12), 311-318.
- El-Gamal, S., El-Salakawy, E.F., and Benmokrane, B. (2005). "Behaviour of Restrained FRP-Reinforced Bridge Decks under Wheel Loads." *ACI Structural Journal*, 102(5), 727-735.
- El-Salakawy, E.F., Benmokrane, B., El-Ragaby, A., and Nadeau, D. (2005). "Field Investigation on the First Bridge Deck Slab Reinforced with Glass FRP Bars Constructed in Canada." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 9(6), 470-479.
- Environment Canada. (2006). <http://www.weatheroffice.ec.gc.ca>
- Graddy, J.C, Kim, J., Whitt, J.H., burns, N.H., and Klingner, R.E. (2002). "Punching-Shear Behaviour of Bridge Decks under Fatigue Loading." *ACI Journal Structural Journal*, 90(3), 257-266.
- Holman, J. O. (1982). "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading." *Fatigue of Concrete Structures, SP-75*, Detroit, Michigan, USA.
- Humar, J. and Razaqpur, G., editors. (2000). "Advanced Composite Materials in Bridges and Structures." *Proceeding of the Third International Conference*, Ottawa, 876p.
- Hwan, B. (1986). "Fatigue Analysis of Plain Concrete in Flexure." *Journal of Structural Engineering*, ASCE,112, (2), 273-288.
- Katz, A. (2000). "Bond to Concrete of FRP Rebars after Cyclic Loading." *Journal of Composites for Construction*, ASCE , 4(3), 137-144.
- Kuang, J.S., and Morly, C.T. (1992). "Punching Shear Behaviour of Restrained Reinforced Concrete Slabs." *ACI Structural Journal*, 89(1),13-19.

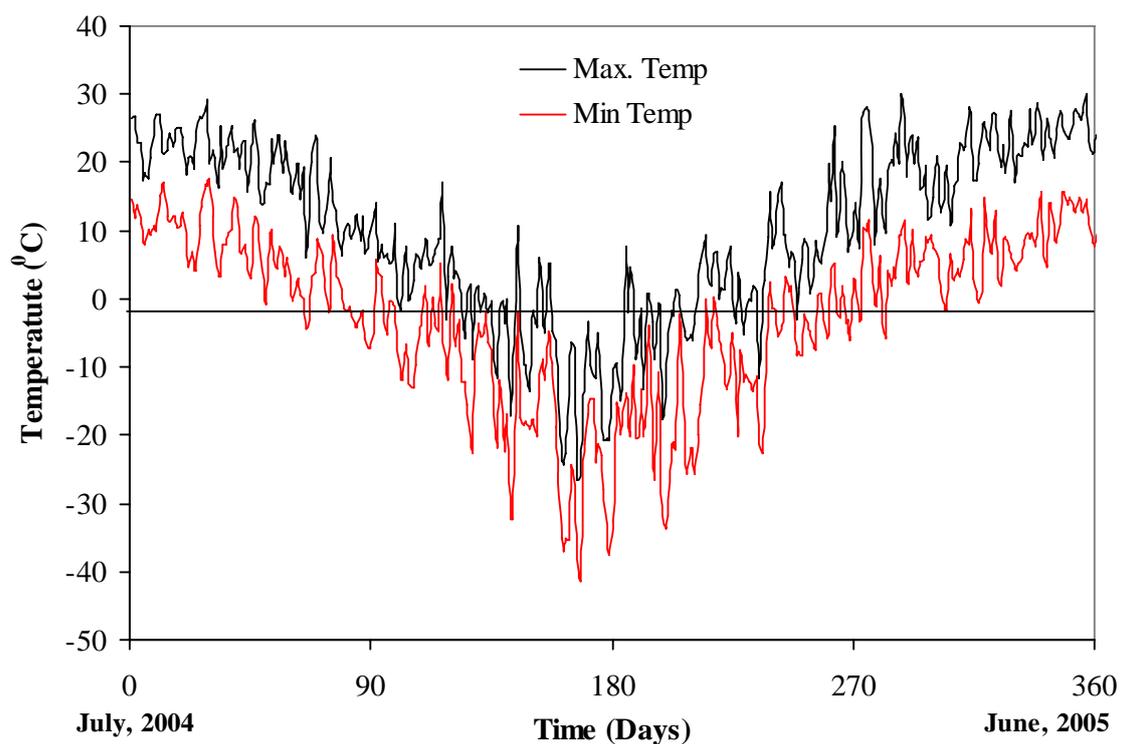
- Kumar, S. and GangaRao, H.V.S. (1998). "Fatigue Response of Concrete Decks Reinforced with FRP Rebars." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(1), 11-16.
- Matsui, S., Tokai, D., Higashiyama, H., and Mizukoshi, M. (2001). "Fatigue Durability of Fibre Reinforced Concrete Decks Under Running Wheel Load." *Proceedings of the Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 982-991.
- Memon, A.H., Mufti, A.A. (2004). "Fatigue Behaviour of Second Generation of Steel-free Concrete Bridge Deck Slab." *Proceedings of the Second International Conference on FRP Composites in Civil Engineering CICE 2004*, University of Adelaide, Adelaide Australia, 765-772.
- Miner, M. (1945). "Cumulative Damage in Fatigue" *Journal of the Applied Mechanics*, Transaction of ASCE, 67(9), 159-164.
- Mufti, A.A., Memon, A.H., Bakht, B., and Banthia, N. (2002). "Fatigue Investigation of the Steel-free Bridge Deck Slab" *ACI international SP-206*, American Concrete Institute, 61-70.
- Mufti, A.A., Memon, A.H., and Klowak, C. (2005). "Study of Static and Fatigue Behaviour of Second Generation Steel Free Concrete Bridge Decks" *Proceeding of the International Workshop on Innovative Bridge Deck Technologies*, Winnipeg, Manitoba, pp. 61-76.
- Nanni, A., and Faza, S. (2002). "Designing and Constructing with FRP Bars: An Emerging Technology" *ACI Concrete International*, 24(11), pp 29-34.
- Pardikaris, P.C., and Beim, S. (1988). "RC Bridges Under Pulsating and Moving Load." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 114(3), 591-607.
- Pultrall Inc. (2004). "V-ROD™ – Technical Data Sheet." ADS Composites Group Inc. <http://www.pultrall.com/>, Thetford Mines, Quebec, Canada.
- Rahman, A.H., Kingsly, C.Y., and Kobayashi, K. (2000). "Service and Ultimate Load Behaviour of Bridge Deck Reinforced with Carbon FRP Grid." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 4(1), 16-23.
- Tilly, G.P. and Moss, D.S. (1982). "Long Endurance Fatigue of Steel Reinforcement." *IABSE Colloquium, Fatigue of steel and concrete structures*, Proceedings, IABSE Reports, Zurich: 229-238.

TABLE AU 1. Détails d'armature des cinq dalles d'essais

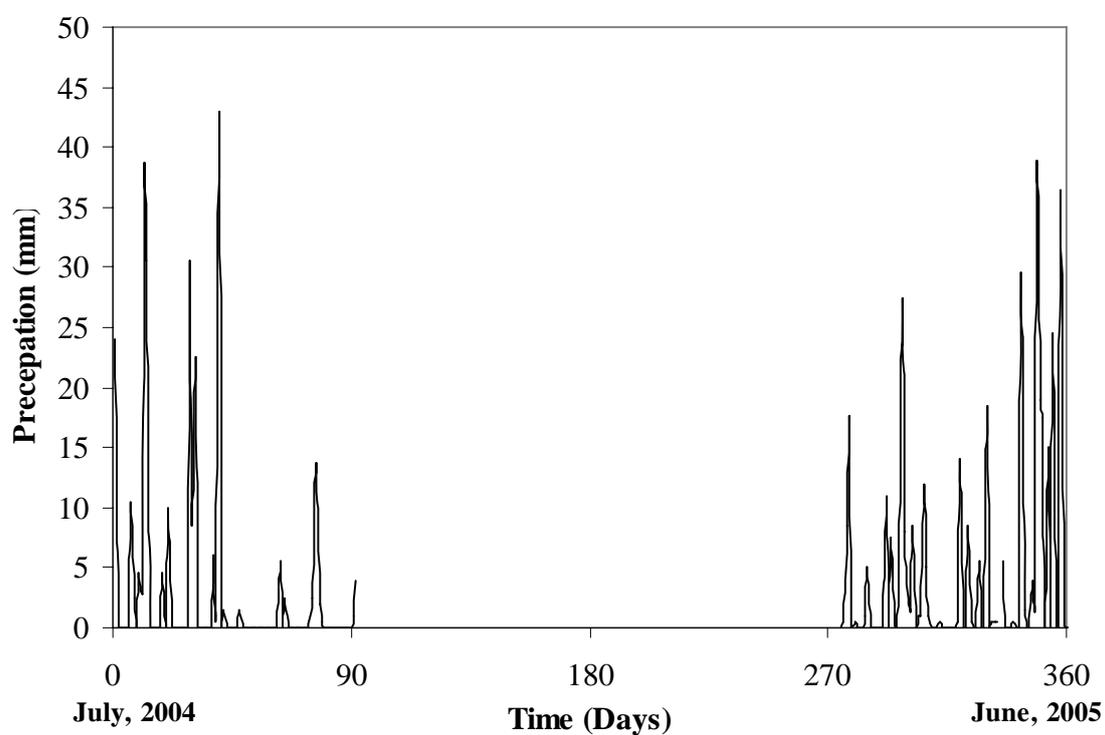
Dalle	Armature (Direction Transversale)		Armature (Direction Longitudinale)	
	Inférieure	Supérieure	Inférieure	Supérieure
S1	No.19@150 mm	No.16 @ 200 mm	No.16 @ 200 mm	No.16 @ 200 mm
S2	No.19 @150 mm	No.16 @ 200 mm	No.16 @ 200 mm	No.16 @ 200 mm
S3	No.19 @150 mm	No.13 @ 300 mm	No.16 @ 200 mm	No.13 @ 300 mm
S4	No.19 @150 mm	-	No.16 @ 200 mm	-
S0	No.10M@210 mm	No.10M@210 mm	No.10M@210 mm	No.10M@210 mm

TABLEAU 2. Propriétés mécaniques des barres d'armatures de PRFV et d'acier

Type de Barre	Diamètre de la Barre (mm)	Aire de la barre (mm <sup>2</sup> )	Module d'Élasticité (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Déformation Ultime %
PRFV No.13	12.7	127	45	756	1.70
PRFV No.16	15.9	198	44	727	1.65
PRFV No.19	19.1	285	44	637	1.37
Acier 10M	11.3	100	200	$f_y = 453$	$\varepsilon_y = 0.2$

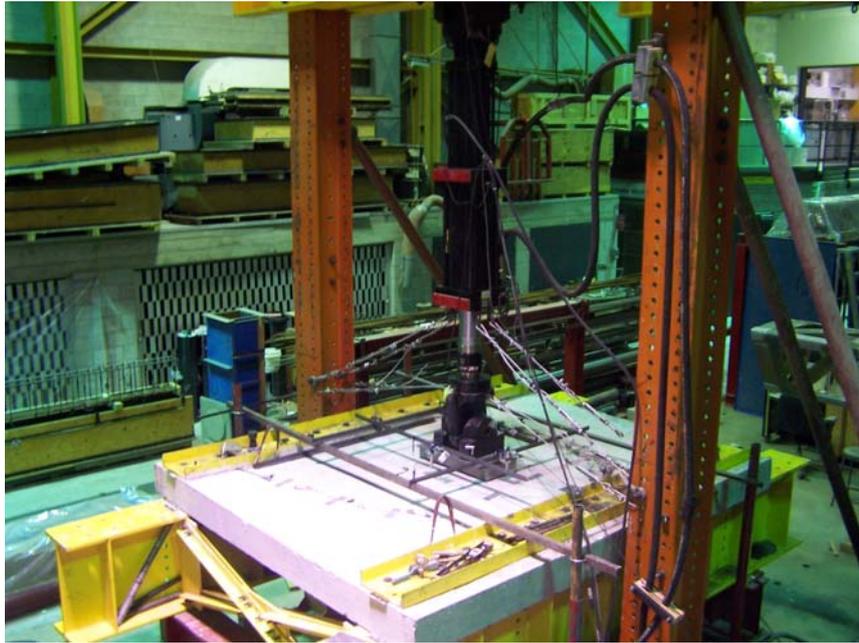


a- Température maximale et minimale (cycles gel-dégel)

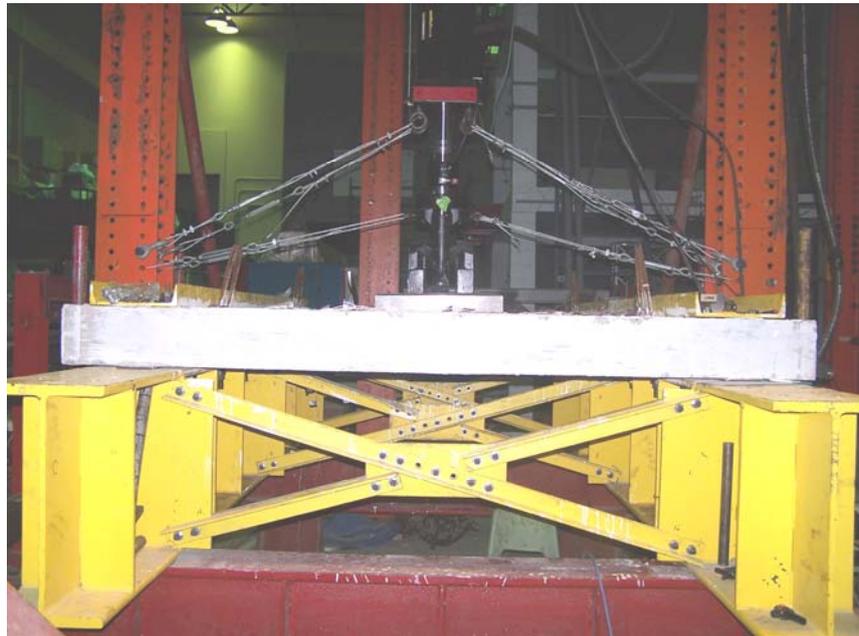


b- Cycles de Mouillage-Séchage

**Fig. 1.** Conditions climatiques durant la conservation des dalles à l'extérieur

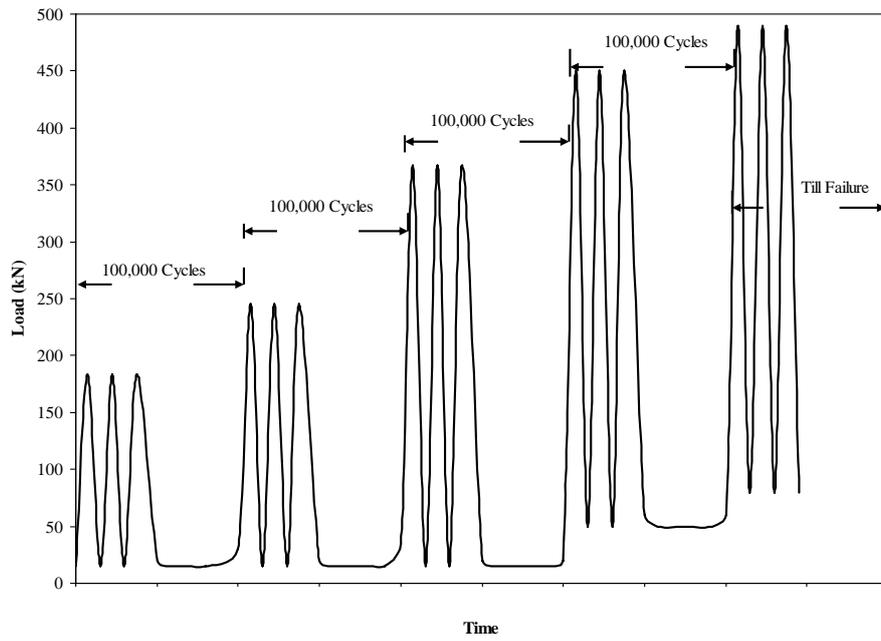


a- Vue d'au-dessus

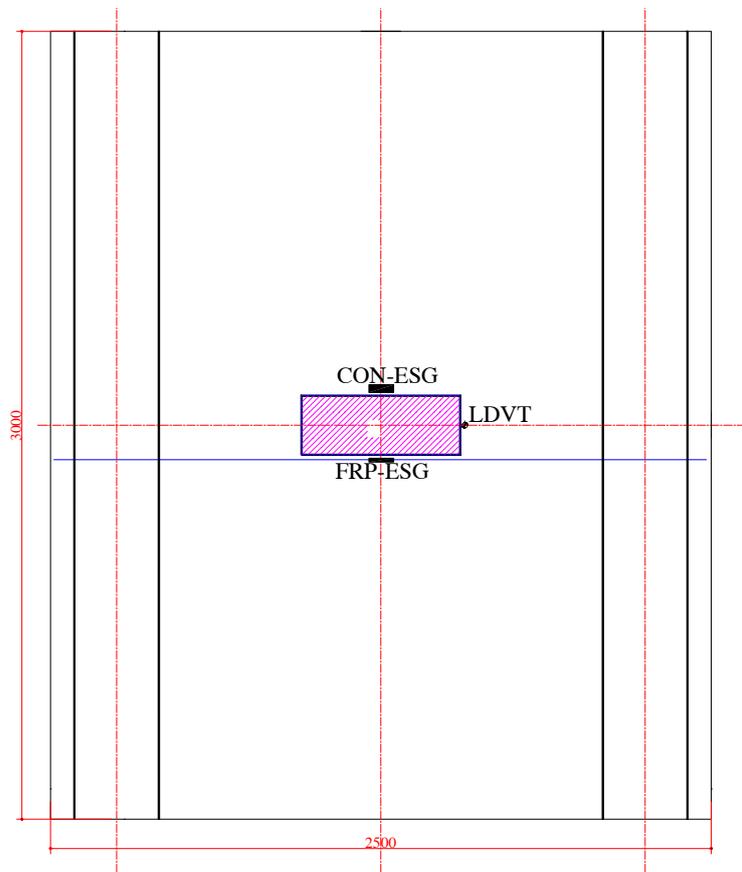


b- Vue de face

**Fig. 2.** Vue du montage d'essai des dalles



**Fig. 3.** Paliers de chargement cyclique à amplitude variable



**Fig. 4.** Localisation des instruments de mesure.

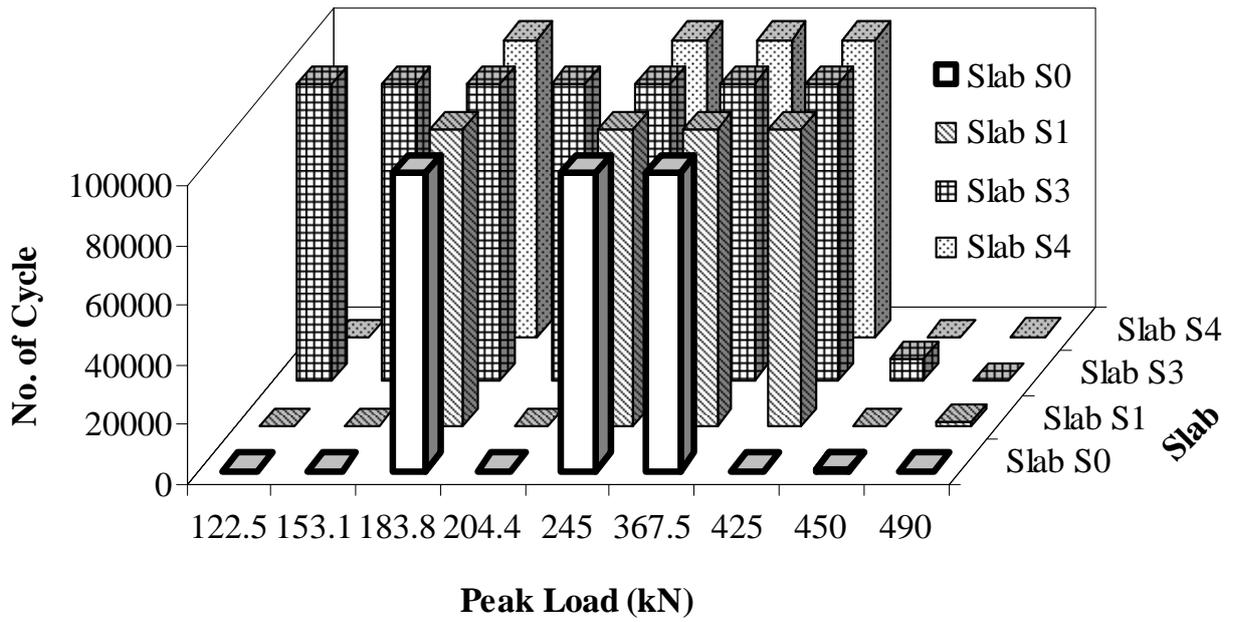


Fig. 5. Nombre de cycles à la rupture des dalles testées.

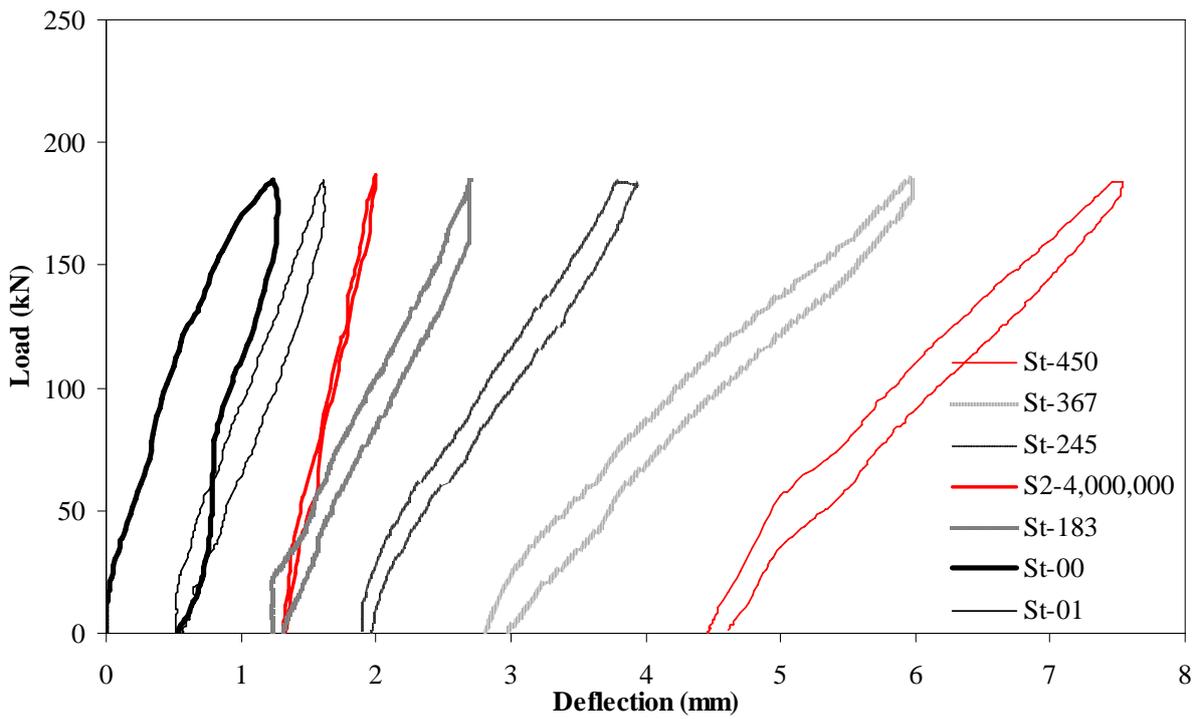
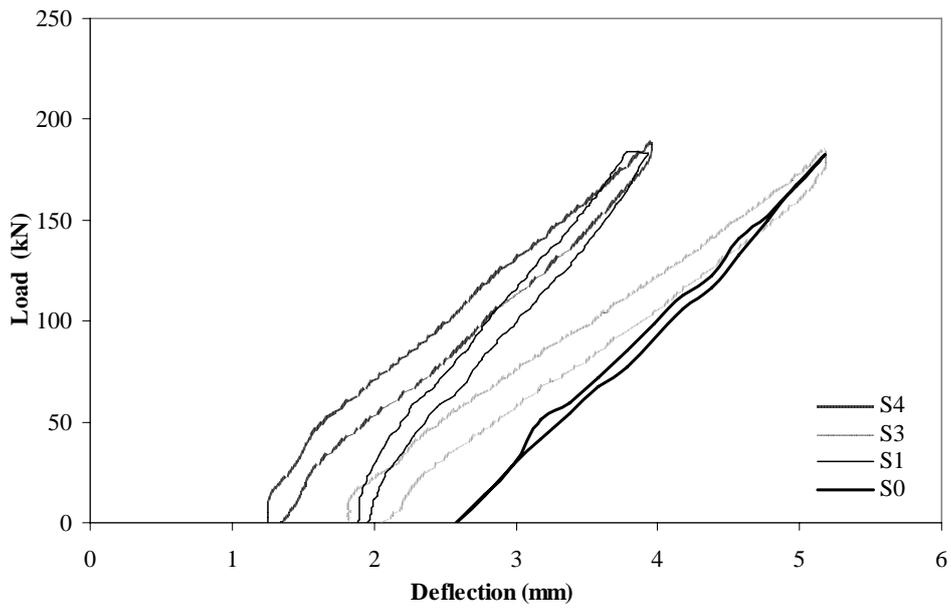
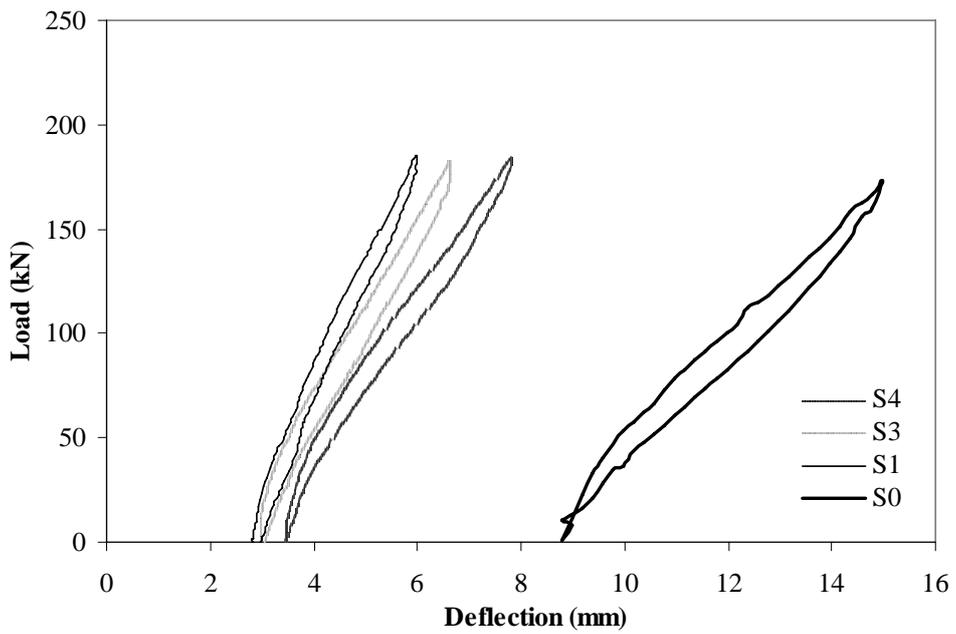


Fig. 6. Réponses des dalles S1 and S2 sous chargement monotone après différents paliers de chargement cyclique

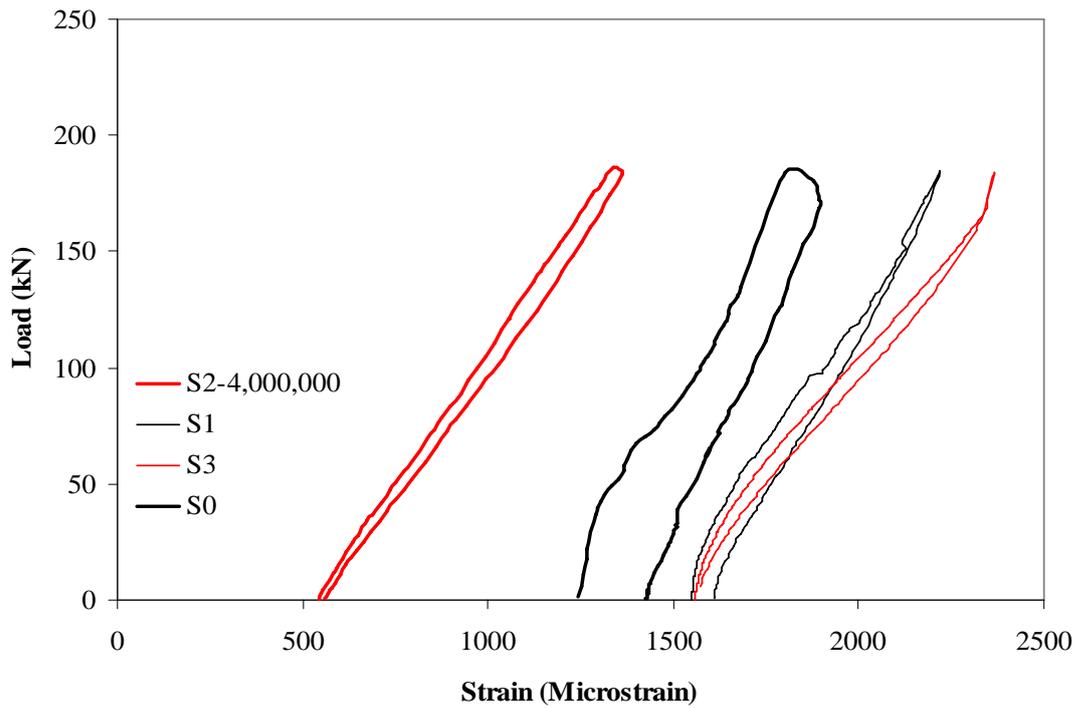


a- Comportement charge-déflexion après le palier de chargement cyclique à 245 kN

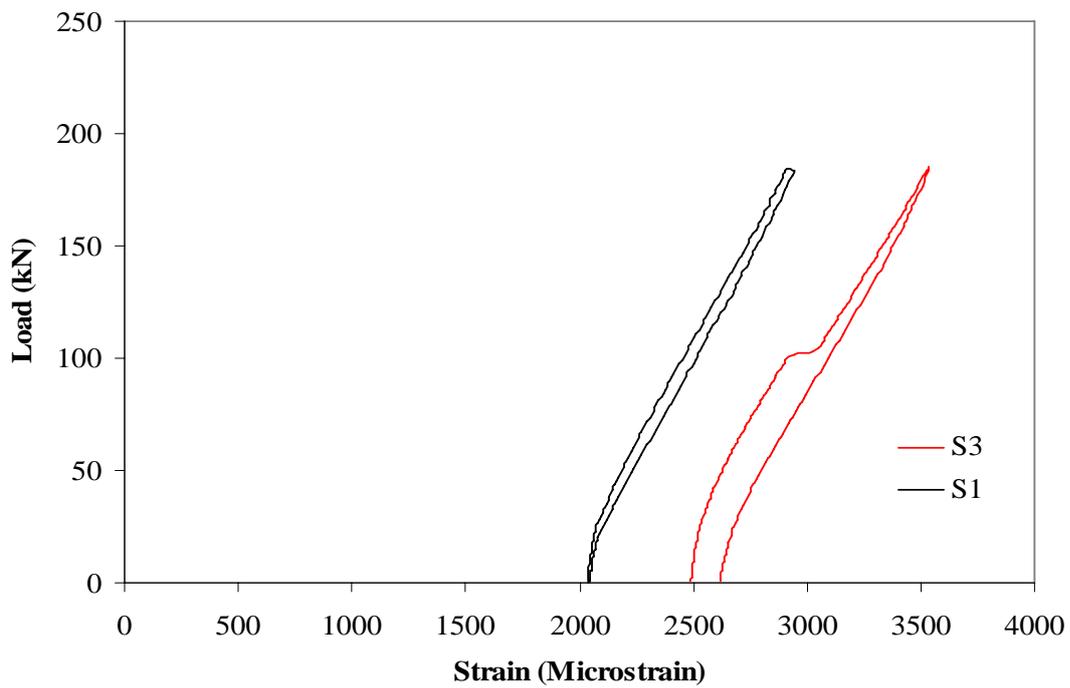


b- Comportement charge-déflexion après le palier de chargement cyclique à 367 kN

**Fig. 7.** Comparaison des réponses des différentes dalles sous chargement monotone (charge-déflexion) après différents paliers de chargement cyclique

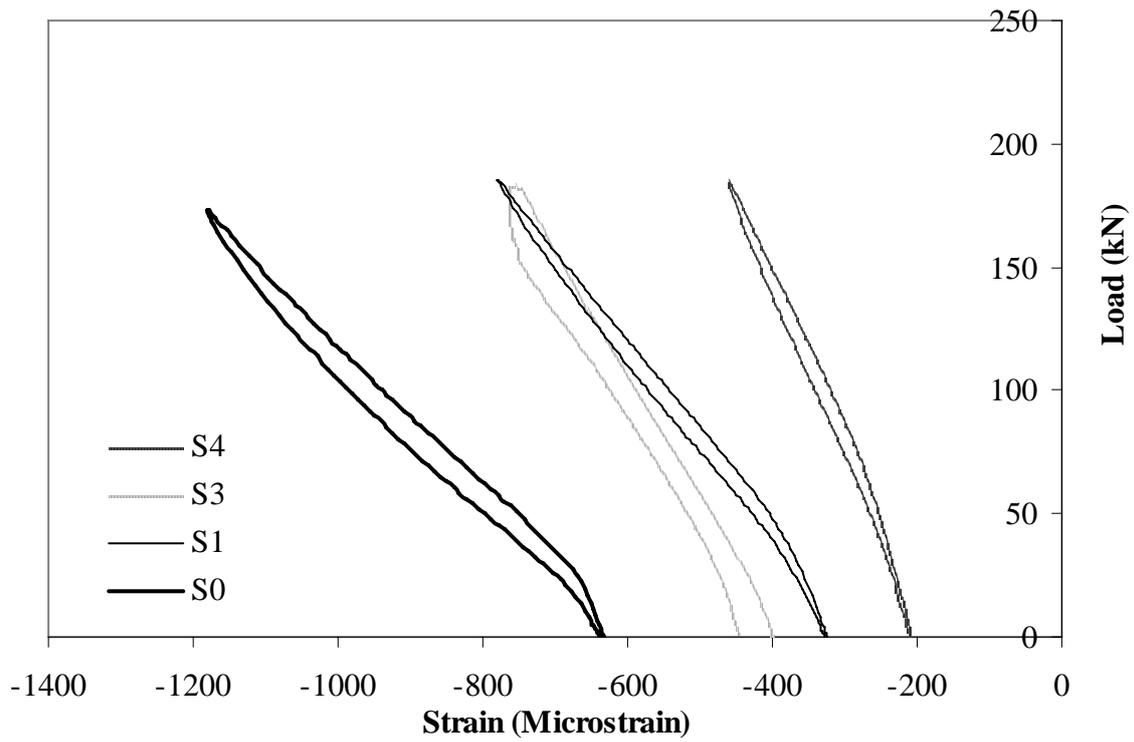


a- Comportement charge-déformation après le palier de chargement cyclique à 183 kN

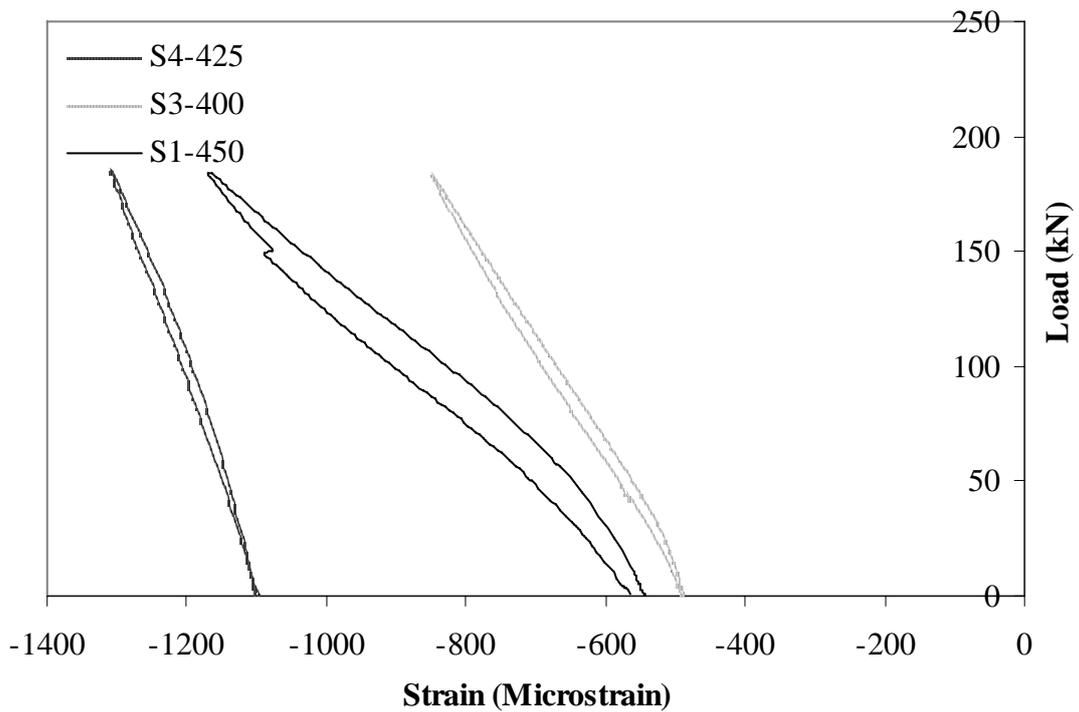


b- Comportement charge-déformation après le palier de chargement cyclique à 245 kN

**Fig. 8.** Comparaison des déformations enregistrées sur l'armature inférieure transversale



a- Comportement charge-déformation après le palier de chargement cyclique à 367 kN



b- Avant rupture

**Fig. 9.** Comparaison des déformations de compression transversale à la face supérieure des dalles pour différents paliers de chargement cyclique

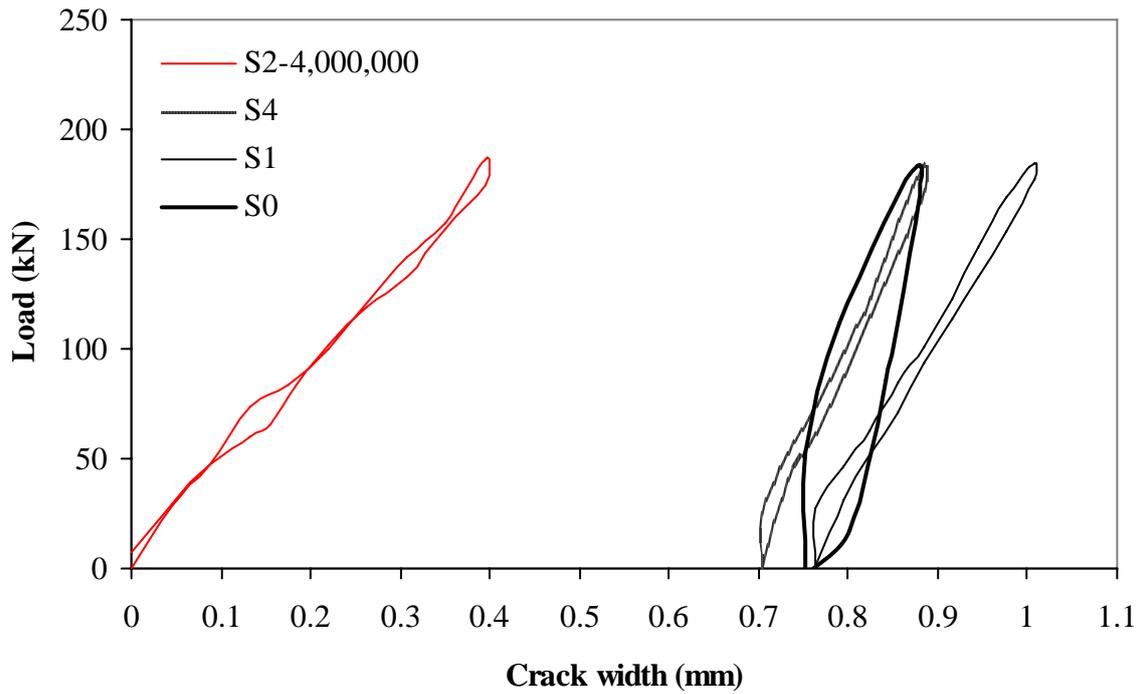


a- Palier de chargement cyclique à 245 kN

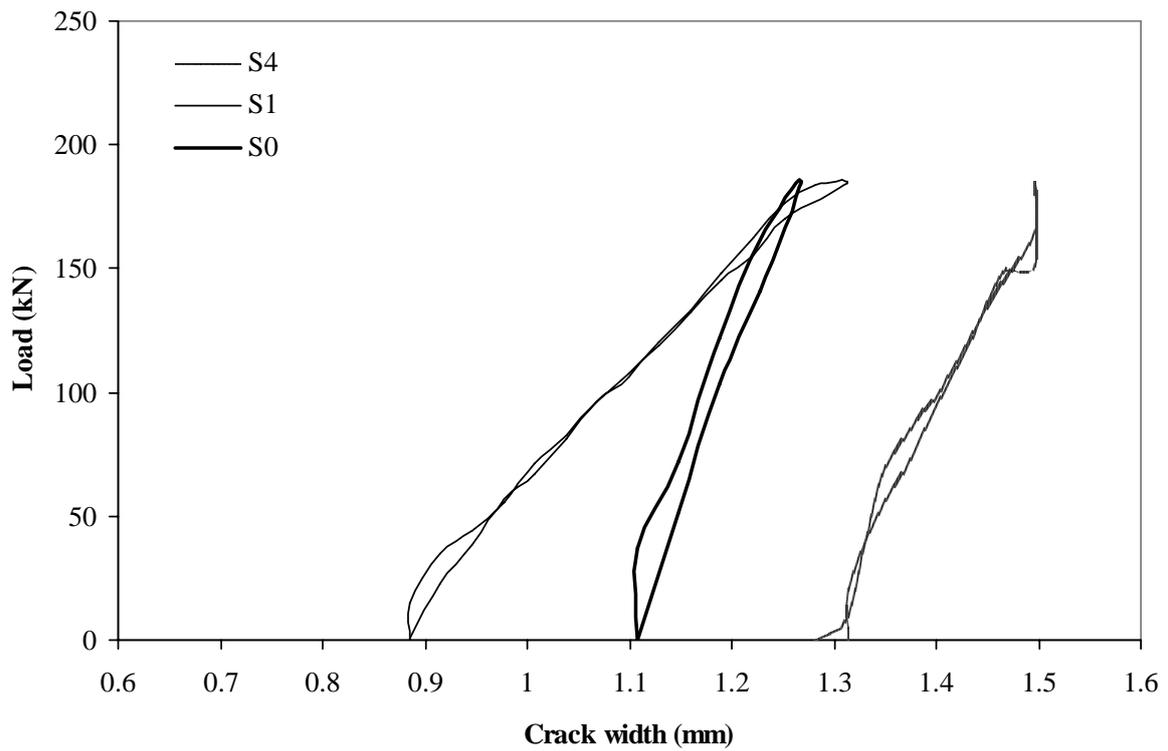


b- Avant rupture

**Fig. 10.** Réseau de fissuration à la face inférieure de la dalle après différents paliers de chargement cyclique



a- Palier de chargement cyclique à 183.8 kN



b- Palier de chargement cyclique à 245 kN

**Fig. 11.** Comparaison des largeurs de fissures à la face inférieure des dalles à différents paliers de chargement cyclique



a- Face inférieure



b- Face supérieure

**Fig. 12.** Mode de rupture des dalles (poinçonnement)