



UNIVERSITÉ DE  
**SHERBROOKE**

FACULTÉ DE GÉNIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT DE DALLES DE PONTS  
EN BÉTON ARMÉ DE BARRES EN PRF SOUMISES À DES CHARGES  
CONCENTRÉES SIMULANT LES CHARGES DE ROUES**

Thèse de doctorat es sciences appliquées (Ph.D.)  
Spécialité : génie civil

Kheireddine BOUGUERRA

Sherbrooke (Québec), Canada

Novembre 2007



## RÉSUMÉ

Au cours des dernières années, la détérioration des structures en béton armé a pris une ampleur sans précédent, et ce, malgré le fait que leur durée de vie en service initialement prévue est loin d'être atteinte. La corrosion de l'armature d'acier est un des principaux facteurs réduisant la durée de vie des ponts en béton armé d'acier. Par ailleurs, l'armature en matériaux composites de polymères renforcés de fibres (PRF) constitue une solution à l'armature métallique afin de pallier au problème de la corrosion d'acier 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 conventionnel), 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. L'utilisation des barres d'armature en PRF pour armer les dalles de tabliers de ponts se concrétise de plus en plus avec l'avancement des recherches dans ce domaine.

La recherche entamée dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans un programme de travaux réalisés au sein de la Chaire de recherche CRSNG/Industrie sur les Matériaux composites novateurs en PRF pour les infrastructures au département de génie civil à l'Université de Sherbrooke. Le comportement de membrures en béton armé de PRF soumis à des sollicitations mécaniques constitue un des principaux axes de recherche. Dans le cadre de cette thèse, une série d'essais a été effectuée sur huit dalles de ponts à confinement interne à grande échelle. Les paramètres des essais comprennent : 1) l'épaisseur de la dalle, 2) le type et le taux d'armature transversale de l'assemblage inférieur, 3) la résistance en compression du béton, et 4) le taux d'armature dans les autres directions (armatures transversale et longitudinale de l'assemblage supérieur et l'armature longitudinale de l'assemblage inférieur). Lors des essais de chargement, les dalles ont été

supportées par deux poutrelles métalliques espacées de 2000 mm centre à centre et soumises à une charge statique concentrée sur une aire de contact de 600 mm x 250 mm afin de simuler une charge de camion (87,5 kN – CL-625) et ce conformément au code Canadien sur le calcul des ponts routiers [CAN/CSA-S6-06]. Aussi, une analyse numérique du comportement des dalles testées sous charges est faite à l'aide d'un logiciel d'éléments finis ADINA version 8.2.

Les essais ont montré que toutes les dalles testées ont rompu par poinçonnement, peu importe le paramètre étudié. Aussi, une épaisseur de dalle de 175 mm répond aux exigences du Canadien sur le calcul des ponts routiers [CAN/CSA-S6-06]. Par ailleurs, les résultats ont montré que la résistance en compression du béton est un paramètre qui influe sur la déflexion, les déformations dans les barres et l'ouverture de fissures. Enfin, les résultats des analyses numériques effectuées corroborent avec ceux obtenus expérimentalement.

**Mots clés :** Dalle de ponts en béton, armature de PRF, charges statiques, flexion, déformations, poinçonnement, éléments finis.

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse le Professeur Brahim Benmokrane de m'avoir accepté dans son groupe de recherche et pour ses judicieux conseils qui ont été essentiels pour réaliser cette thèse.

J'adresse aussi de vifs remerciements aux Dr. Brahim Tighiouart et Dr. Ehab El-Salakawy pour leurs précieux conseils.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont aidé de proche ou de loin à concrétiser ce travail de recherche et en particulier les techniciens Simon Sindyigaya et François Ntacorigira, les membres du groupe de recherche du Professeur Benmokrane. et M. Zoubir Cherrak et M. Abdallah Yahiaoui pour leur aide et précieux conseils.

J'aimerais également remercier les organisations suivantes pour leurs contributions à la réalisation de cette recherche: 1) le ministère des Transports du Québec; 2) Pultrall Inc., (Thetford Mines, Québec); 3) le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et 4) le Réseau Canadien de Centres d'excellences sur les innovations en structures avec systèmes de détection intégrés ISIS-Canada (Winnipeg, Manitoba).

Finalement, j'aimerais remercier tous les membres du jury qui me font l'honneur d'avoir accepté de lire et d'évaluer ma thèse.

## TABLES DES MATIÈRES

|                           |      |
|---------------------------|------|
| RÉSUMÉ .....              | ii   |
| REMERCIEMENTS.....        | iv   |
| TABLES DES MATIÈRES ..... | v    |
| LISTE DES FIGURES .....   | viii |
| LISTE DES TABLEAUX.....   | xii  |

### 1. INTRODUCTION

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 Généralités .....                                                         | 1  |
| 1.2 Propriétés des matériaux composites de PRF utilisés en construction ..... | 4  |
| 1.2.1 Introduction.....                                                       | 4  |
| 1.2.2 Le renfort fibreux .....                                                | 5  |
| 1.2.3 La matrice .....                                                        | 9  |
| 1.2.4 Les barres d'armature de PRF.....                                       | 10 |
| 1.3 Contexte de l'étude .....                                                 | 11 |
| 1.4 Objectifs de la thèse .....                                               | 13 |
| 1.5 Organisation de la thèse .....                                            | 14 |

### 2. ÉTAT DE CONNAISSANCES

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Introduction.....                                                                                               | 16 |
| 2.2 Conception des dalles de tablier de pont.....                                                                   | 18 |
| 2.2.1 Calcul de flexion.....                                                                                        | 18 |
| 2.2.2 Calcul par la méthode empirique .....                                                                         | 19 |
| 2.3 Dalles de tabliers de ponts en béton à armé de PRF.....                                                         | 23 |
| 2.3.1 Chapitre 16 du Code Canadien sur le calcul des ponts routiers [CAN/CSA-S6-06] .....                           | 23 |
| 2.3.2 Comparaison entre sections en béton armé de PRF et celles en béton armé d'acier .....                         | 24 |
| 2.4 Études antérieures sur les dalles de tablier de ponts et les dalles bidirectionnelles armées de PRF .....       | 25 |
| 2.4.1 Dalles de tabliers de ponts renforcées avec des barres de PRF .....                                           | 25 |
| 2.4.2 Dalles bidirectionnelles en béton armé avec des barres de PRF.....                                            | 29 |
| 2.5 Rupture par poinçonnement.....                                                                                  | 33 |
| 2.6 Modèles de calcul de la capacité portante des dalles en béton .....                                             | 36 |
| 2.7 Calcul de la résistance au poinçonnement de dalles armées d'acier selon les guides et codes.....                | 41 |
| 2.7.1 Code ACI (ACI-318-2005).....                                                                                  | 41 |
| 2.7.2 Code CSA (A23.3-04) .....                                                                                     | 42 |
| 2.7.3 Standard Britannique (BS 8110, 1997).....                                                                     | 43 |
| 2.8 Modèles de calcul de la résistance au poinçonnement pour les dalles bidirectionnelles en béton armé de PRF..... | 44 |
| 2.8.1 Modèle japonais (JSCE 1997) .....                                                                             | 44 |
| 2.8.2 Modèle proposé par El-Ghandour et al. (1999) .....                                                            | 45 |
| 2.8.3 Modèle proposé par Mattys et Taerwe (2000).....                                                               | 46 |
| 2.8.4 Modèle proposé par Ospina et al. (2003).....                                                                  | 47 |

|       |                                                |    |
|-------|------------------------------------------------|----|
| 2.8.5 | Modèle proposé par El-Gamal et al. (2005)..... | 47 |
| 2.8.6 | Modèle d'ACI 440.1R-06 (2006) .....            | 48 |

### 3.PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

|       |                                                    |    |
|-------|----------------------------------------------------|----|
| 3.1   | Généralités .....                                  | 50 |
| 3.2   | Propriétés des matériaux .....                     | 50 |
| 3.2.1 | Propriétés du béton .....                          | 50 |
| 3.2.2 | Propriétés de l'armature en acier .....            | 51 |
| 3.2.3 | Propriétés de l'armature en PRF.....               | 51 |
| 3.3   | Échantillons d'essai .....                         | 53 |
| 3.3.1 | Généralités .....                                  | 53 |
| 3.3.2 | Dalles d'essai .....                               | 54 |
| 3.4   | Fabrication des échantillons d'essai.....          | 60 |
| 3.4.1 | Coffrage .....                                     | 60 |
| 3.4.2 | Préparation des armatures et coulage du béton..... | 61 |
| 3.4.3 | Instrumentation des dalles.....                    | 63 |
| 3.5   | Dispositif et procédure d'essais .....             | 67 |

### 4.PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS D'ESSAIS

|       |                                             |     |
|-------|---------------------------------------------|-----|
| 4.1   | Introduction .....                          | 71  |
| 4.2   | Comportement général des dalles .....       | 72  |
| 4.2.1 | Comportement en déflexion.....              | 72  |
| 4.2.2 | Capacité ultime et mode de rupture .....    | 72  |
| 4.2.3 | Déformations des armatures et du béton..... | 73  |
| 4.2.4 | Largeurs et réseaux des fissures.....       | 74  |
| 4.3   | Effet de l'épaisseur de la dalle .....      | 75  |
| 4.3.1 | Introduction.....                           | 75  |
| 4.3.2 | Comportement charge-déflexion .....         | 76  |
| 4.3.3 | Capacité ultime et mode de rupture .....    | 79  |
| 4.3.4 | Déformations des armatures et du béton..... | 81  |
| 4.3.5 | Largeurs et réseaux de fissures .....       | 86  |
| 4.3.6 | Conclusions partielles .....                | 89  |
| 4.4   | Effet du type d'armature .....              | 91  |
| 4.4.1 | Introduction.....                           | 91  |
| 4.4.2 | Comportement en déflexion.....              | 92  |
| 4.4.3 | Capacité ultime et mode de rupture .....    | 96  |
| 4.4.4 | Déformations des armatures et du béton..... | 99  |
| 4.4.5 | Largeurs et réseaux de fissures .....       | 104 |
| 4.4.6 | Conclusions partielles .....                | 107 |
| 4.5   | Effet de la résistance du béton .....       | 109 |
| 4.5.1 | Introduction.....                           | 109 |
| 4.5.2 | Comportement en déflexion.....              | 109 |
| 4.5.3 | Capacité ultime et mode de rupture .....    | 112 |
| 4.5.4 | Déformations des armatures et du béton..... | 114 |
| 4.5.5 | Largeurs et réseaux de fissures .....       | 118 |
| 4.5.6 | Conclusions partielles .....                | 121 |