

**Chaire de recherche CRSNG-industrie sur les renforcements en matériaux composites novateurs en PRF pour les infrastructures de béton**

## **Conception optimale de dalles de chaussées en béton jointées avec des goujons en matériaux composites en polymères renforcés de fibres de verre R 679.2**

### **Rapport final**



**Préparé par:**

**Julien Bricola, Ehab Ahmed, et Brahim Benmokrane**

Département de génie civil

Faculté de génie

Université de Sherbrooke,

Sherbrooke, Québec, J1K 2R1

Tel: (819) 821-7758

Fax: (819) 821-7974

Courriel: [Brahim.Benmokrane@USherbrooke.ca](mailto:Brahim.Benmokrane@USherbrooke.ca)

**Soumis à :**

**Denis Thébeau, ing.**

Chargé de projet, Ministère des Transports du Québec

Secteur expertise en conception des chaussées

Québec (Québec), G1S 4X9

**18 Janvier 2014**

© Benmokrane et al.

## **Résumé**

Les goujons d'acier sont utilisés dans les dalles de chaussées, appelées communément dalles courtes goujonnées, pour transférer les charges du trafic à la dalle (par l'entremise des joints transversaux) et pour permettre le mouvement longitudinal des dalles aux joints dû aux écarts de température. Les dalles de chaussées en béton jointées sont cependant exposées à des conditions environnementales très sévères favorisant la corrosion des goujons d'acier et la dégradation des joints.

En Amérique du Nord et plus particulièrement au Québec, la corrosion des goujons d'acier est davantage accélérée par l'épandage de sels de déglacage réduisant la durée de vie de la chaussée et engendrant des coûts d'entretien et également des conséquences sur le trafic et les usagers (fermetures d'autoroutes et déviation du trafic rendus nécessaires par les travaux d'entretien). Aussi, les joints transversaux dans les dalles de chaussées constituent des éléments structuraux importants qui, non seulement doivent être durables, mais aussi doivent résister aux charges répétées dues au passage des véhicules. Le type de goujon standard utilisé actuellement est le goujon en acier recouvert d'époxy. L'utilisation de goujons en d'autres matériaux comme les composites de polymère renforcé de fibres (PRF) sans corrosion est maintenant considérée comme une solution efficace à ce problème. Ces nouveaux types de goujons en matériaux composites de PRF pourraient constituer une méthode alternative à ceux d'acier et revêtus d'époxy actuellement utilisés par le Ministère des Transports du Québec.

En plus de l'aspect corrosion, l'aspect économique entre en jeu. En fait, les goujons en acier sont importés des États-Unis et on doit faire face à la variation du taux de change qui n'est pas toujours en notre faveur. De plus, le coût de l'acier a varié énormément dans les dernières années. En ayant un fournisseur local d'armatures en PRFV, il serait possible de contrer le taux de change et la variation du coût de l'acier et donc d'avoir, lorsque la situation est favorable, de meilleurs coûts pour les goujons des dalles courtes goujonnées.

Cette initiative a été retenue par le Ministère des Transports du Québec et a fait l'objet d'un premier projet de recherche (devis No R679.P1) entre 2010 et 2011. Les essais structuraux préliminaires réalisés lors du premier projet de recherche (devis No R679.P1) ont montré que les goujons en matériaux composites de PRFV ont une bonne performance structurale sous conditions de service à long terme. Cependant ces essais (au nombre très limité) ne permettent pas d'établir l'équivalence entre le goujon d'acier et celui en matériaux composites PRFV notamment en ce qui a trait à l'efficacité du joint ou l'efficience du transfert de charge similaire.

Ce projet de recherche (devis No R679.P2), en continuité du projet de recherche précédant (devis No R679.P1), vise à optimiser le design de dalles de chaussées en béton jointées avec des goujons en matériaux composites en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) à l'aide d'essais structuraux additionnels afin de proposer les bonnes dimensions du goujon en PRFV à utiliser dans les dalles de chaussées en béton jointées des autoroutes au Québec. En optimisant la grosseur et le nombre de goujons de PRFV à

utiliser, on pourra ainsi réduire le coût des dalles courtes goujonnées avec PRFV qui pourrait devenir moins cher que celui avec des goujons d'acier. Vingt (20) spécimens de dalles jointées ont été fabriqués et testés dans le cadre de ce projet. Les variables d'étude comprenaient le diamètre du goujon (31,8 mm, 34,9 mm, 38,1 mm, 41,3 mm et 44,5 mm pour le PRFV et 31,8 mm, 34,9 mm et 38,1 mm pour l'acier), la longueur des goujons (458 mm et 610 mm), l'espacement entre les goujons (305 mm et 230 mm), l'ouverture du joint des dalles : 19,05 mm (joint à froid) et 3,5 mm (joint scié au tiers de l'épaisseur de la dalle, comme réalisé sur le terrain), le type de goujon (PRFV et acier), et le type de chargement (statique et cyclique). Deux phases de recherche ont été ainsi réalisées dans le cadre de ce projet :

1. Une première phase (Phase I) comprenant huit spécimens de dalles jointées ayant toutes une ouverture du joint de 19,05 mm.
2. Une deuxième phase (Phase II) comprenant douze spécimens de dalles jointées ayant toutes une ouverture du joint de 3,5 mm.

À noter que ce projet de recherche s'inscrit dans la *Stratégie de développement durable 2009-2013* du ministère des Transports en rejoignant les principes de développement durable suivants :

1. Protection de l'environnement : Ce matériau (matériaux composites de PRFV) est recyclable et permettra, en ne corrodant pas, de performer plus longtemps que les goujons en acier. Le nombre d'interventions d'entretien en serait donc diminué et la reconstruction du revêtement repoussé dans le temps. Ceci aura moins d'impact sur les usagers.
2. Efficacité économique : En optimisant le nombre de goujons en PRFV, le coût des dalles courtes goujonnées en utilisant les goujons en PRFV pourrait devenir moins cher que celui avec l'acier.
3. Accès au savoir : La recherche de l'innovation dans ce domaine sera stimulée.

Ce rapport final présente les résultats obtenus dans le cadre de ce projet et propose des recommandations pour la grosseur de goujon de PRFV à utiliser pour le design et la construction des chaussées de dalles jointées des autoroutes du Québec.

---

*Mots-clefs : dalle de béton jointée, goujons de PRFV, durabilité, corrosion.*

## Table des matières

<b>Chapitre 1. Introduction.....</b>	<b>5</b>
1.1 Mise en contexte et problématique .....	5
1.2 Objectifs du projet de recherche .....	6
<b>Chapitre 2. Programme expérimental et résultats .....</b>	<b>8</b>
2.1 Introduction.....	8
4.2 Spécimens d’essais de la Phase I et résultats .....	9
4.3 Spécimens d’essais de la Phase II et résultats.....	22
<b>Chapitre 3. Conclusions et recommandations .....</b>	<b>34</b>

# Chapitre 1. Introduction

## 1.1 Mise en contexte et problématique

Les chaussées rigides en béton sont conçues pour des trafics routiers importants et lourds. Leur rigidité permet de proposer une solution plus performante que les autres structures vis-à-vis du comportement structural de la chaussée (déformations, orniérage, nids de poule, fatigue, pompage des sols, comportement au dégel). Dans les dalles de chaussées en béton jointées, les goujons assurent le transfert des charges au niveau des joints conservant l'alignement horizontal et vertical des dalles, et permettant les déformations dues aux écarts de températures. Le système joint/goujons est donc un élément structural primordial vis-à-vis de la durabilité de ces structures.

Au Québec ces structures sont affectées par des conditions environnementales très rudes (cycles de gel/dégel, écarts thermiques), doublées de l'emploi de sels de déglacages. Le comportement structural est affecté par la perte de capacité à transmettre les charges, et par le verrouillage partiel ou total du joint entraîné par les mécanismes d'expansion dus à la corrosion des goujons. Les mouvements des dalles étant empêchés, des contraintes se développent et entraînent la fissuration du béton, accélérant encore les processus de dégradation. Ceci entraîne la dégradation prématurée des goujons, du béton, et par ces biais des joints. Les conséquences sont les suivantes :

1. Réduction de la durée de vie de la structure par rapport au design initial ;
2. Coûts d'entretien élevés ;
3. Impact sur le confort de roulement ;
4. Impact sur les usagers (réductions/fermeture du trafic dû aux travaux nécessaires).

Aussi, les joints dans les dalles de chaussées en béton jointées constituent des éléments structuraux décisifs qui, non seulement doivent être durables, mais aussi doivent présenter un bon comportement à la fatigue, préservant les sols supports.

Pour d'autres types de structure de génie civil concernés par ces problèmes de corrosion et de durabilité, les matériaux composites de polymères renforcés de fibres (PRF) offrent déjà des solutions efficaces à ce problème tant sur le plan structural que vis-à-vis de la durabilité (conception d'ouvrages, réhabilitations par renforts externes).

Les nouvelles générations de goujons en matériaux composites de polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) peuvent désormais être envisagées comme une solution sans corrosion, allongeant la durée de service de ces structures de chaussées et répondant aux critères structuraux.

Sur la base des résultats obtenus lors du premier projet de recherche (devis No R679.P1), réalisé entre 2010 et 2011, il a été recommandé au MTQ de considérer l'utilisation à grande échelle des goujons en matériaux composites de PRFV à base de résine vinylester

dans les chaussées en béton des routes et autoroutes de la province. Aussi, tous les spécimens de dalles de chaussées jointées testés ont présenté d'excellents résultats sous conditions de service à long terme tout en demeurant non fissuré.

Cependant, une continuité du projet de recherche (devis No R679.P1) devrait être entreprise dans le but d'optimiser le design de dalles jointées utilisant les nouveaux goujons de PRFV à base de vinylester à l'aide d'essais structuraux additionnels afin de proposer les bonnes dimensions du goujon en PRFV à utiliser dans les dalles de chaussées en béton jointées des autoroutes au Québec. En optimisant la grosseur et le nombre de goujons de PRFV à utiliser, on pourra ainsi réduire le coût des dalles courtes goujonnées avec PRFV qui pourrait devenir moins cher que celui avec des goujons d'acier.

L'utilisation de ces nouveaux goujons de PRFV à base de vinylester et l'optimisation du design permettront le développement d'une nouvelle génération de chaussées en béton jointé à durabilité accrue, sécuritaires et performantes sur le plan économique.

## **1.2 Objectifs du projet de recherche**

L'objectif général de ce projet de recherche vise à évaluer la performance structurale des goujons de PRFV pour concevoir des chaussées de dalles jointées de durabilité accrue, sécuritaires et performantes sur le plan économique et constituer une méthode alternative à ceux d'acier et revêtus d'époxy actuellement utilisés par le Ministère des Transports du Québec (MTQ).

L'évaluation de la performance structurale comprend la fabrication et la mise à l'essai de spécimens de dalles jointées. Les variables d'étude retenues dans le cadre de ce projet de recherche (devis No R679.P1) comprennent :

1. Le diamètre du goujon (31,8 mm, 34,9 mm, 38,1 mm, 41,3 mm et 44,5 mm pour le PRFV et 31,8 mm, 34,9 mm et 38,1 mm pour l'acier)
2. La longueur des goujons (458 mm et 610 mm)
3. L'espacement entre les goujons (305 mm et 230 mm)
4. L'ouverture du joint des dalles : 19,05 mm (joint à froid) et 3,5 mm (joint scié au tiers de l'épaisseur de la dalle, comme réalisé sur le terrain)
5. Le type de goujon (PRFV et acier)
6. Le type de chargement (statique et cyclique).

Deux phases de recherche ont été ainsi réalisées dans le cadre de ce projet :

- Une première phase (Phase I) comprenant huit spécimens de dalles jointées ayant toutes une ouverture du joint de 19,05 mm.
- Une deuxième phase (Phase II) comprenant douze spécimens de dalles jointées ayant toutes une ouverture du joint de 3,5 mm.

À noter que ce projet de recherche s'inscrit dans la *Stratégie de développement durable*

2009-2013 du ministère des Transports en rejoignant les principes de développement durable suivants :

4. Protection de l'environnement : Ce matériau (matériaux composites de PRFV) est recyclable et permettra, en ne corrodant pas, de performer plus longtemps que les goujons en acier. Le nombre d'interventions d'entretien en serait donc diminué et la reconstruction du revêtement repoussé dans le temps. Ceci aura moins d'impact sur les usagers.
5. Efficacité économique : En optimisant le nombre de goujons en PRFV, le coût des dalles courtes goujonnées en utilisant les goujons en PFV pourrait devenir moins cher que celui avec l'acier.
6. Accès au savoir : La recherche de l'innovation dans ce domaine sera stimulée.

Ce rapport final présente les résultats obtenus dans le cadre de ce projet et propose des recommandations pour la grosseur de goujon de PRFV à utiliser pour le design et la construction des chaussées de dalles jointées des autoroutes du Québec.

Les essais ont été réalisés en utilisant des goujons de PRFV à base de vinylester manufacturés par la compagnie Pultrall Inc. de Thetford Mines (Québec, Canada).

# Chapitre 2. Programme expérimental et résultats

## 2.1 Introduction

Deux phases de recherche ont été ainsi réalisées dans le cadre de ce projet :

1. Une première phase (Phase I) comprenant huit spécimens de dalles jointées ayant toutes une ouverture du joint de 19,05 mm.
2. Une deuxième phase (Phase II) comprenant douze spécimens de dalles jointées ayant toutes une ouverture du joint de 3,5 mm.

Une description détaillée des spécimens testés dans ces deux phases d'étude sera donnée ci-dessous.

La performance structurale des spécimens de dalles jointées a été caractérisée par calcul de l'efficacité du joint (*joint effectiveness*) (ACPA). Ce dernier est basé sur la déflexion de deux dalles adjacentes (l'une chargée, l'autre déchargée de part et d'autre du joint). Une efficacité du joint de 100% se traduit par une déflexion identique des deux dalles, à contrario, une efficacité de 0% ne permet le déplacement que de la dalle chargée comme illustré dans les figures 2.1 et 2.2 :

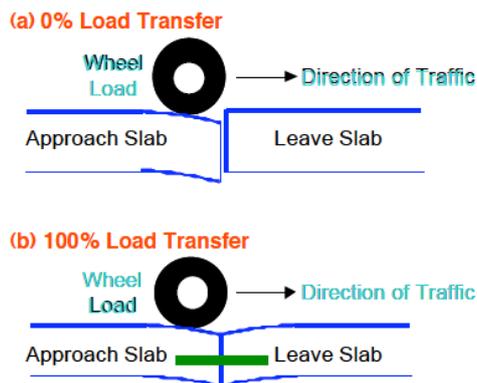


Figure 2.1 : Illustration du transfert de charge [Smith, 2001]

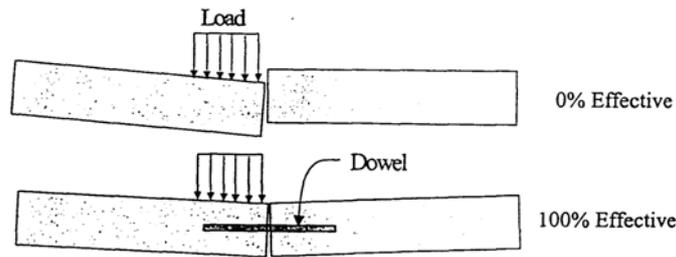


Figure 2.2 : Efficacité du joint [Eddie et al., 2001]

L'efficacité du joint est calculée avec l'équation 2.1 suivante :

$$E = \frac{2d_u}{d_l + d_u} \times 100 \quad \text{Équation 2.1}$$

Avec  $E$  : efficacité du joint (%)  
 $d_u$  : déflexion de la dalle déchargée  
 $d_l$  : déflexion de la dalle chargée

Un fonctionnement satisfaisant du joint est garanti à partir d'une efficacité de 75% selon l'AASHTO qui détermine aussi un paramètre similaire qui est l'efficacité du transfert de charge (*Load Transfer Efficiency*, LTE), calculé comme indiqué par l'équation 2.2 ci-après :

$$LTE = \frac{d_u}{d_l} \times 100 \quad \text{Équation 2.2}$$

Un transfert satisfaisant est obtenu dès la valeur de 60% selon les critères de l'AASHTO.

LTE et E sont reliés par l'équation suivante :

$$LTE = \left[ \frac{2}{2-E} - 1 \right] \times 100 \quad \text{Équation 2.3}$$

Ainsi, une efficacité de 75% correspond à un transfert de charge de 60%.

## 4.2 Spécimens d'essais de la Phase I et résultats

Huit spécimens de dalles jointées ont fait l'objet de cette Phase I du projet de recherche. Six spécimens ont été soumis à des charges statiques et les deux autres à des charges cycliques. La géométrie des spécimens fabriqués et testés est analogue à celle utilisée dans le premier projet de recherche (Montaigu et Coll., 2011). Les dimensions de chaque spécimen sont: 2440 mm de long  $\times$  610 mm de large  $\times$  254 mm d'épaisseur [96  $\times$  24  $\times$  10 po.]. La figure 2.3 montre les dimensions des spécimens alors que le tableau 2.1 présente

les détails sur les huit spécimens d'essais de cette phase. Les huit dalles ont été coulées avec un joint de 19,05 mm [0.75 po.] et deux goujons espacés de 305 mm [12 po.].

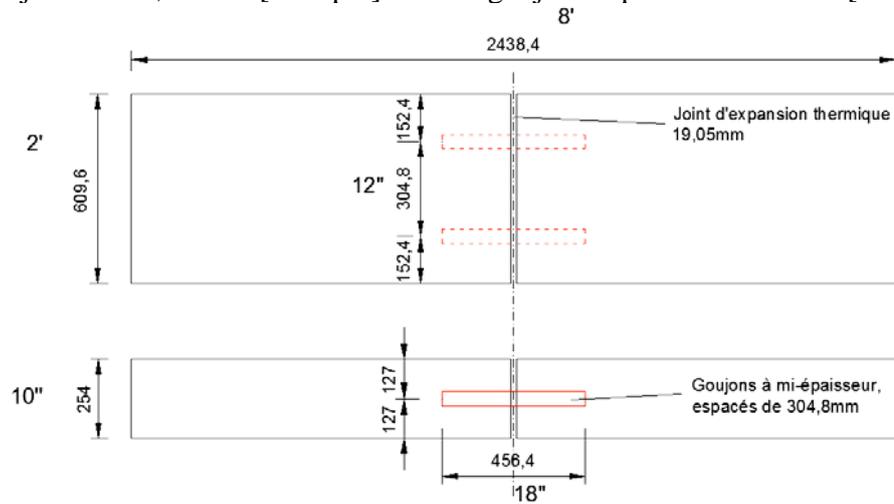


Figure 2.3: Géométrie des spécimens d'essais de la Phase I

Tableau 2.1: Détails des spécimens de dalles jointées de la Phase I

Dalle No.	Type de goujon	Diamètre du goujon	No du spécimen	Espacement des goujons	Longueur du goujon	Type de charge	Position de la charge
1	GFRP	31.8	G-31.8-1	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
2	GFRP	31.8	G-31.8-2	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
3	GFRP	31.8	G-31.8-EC	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Excentrique
4	GFRP	31.8	G-34.9-1	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
5	GFRP	34.9	G-34.9-2	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
6	GFRP	34.9	G-34.9-EC	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Excentrique
7	GFRP	34.9	G-31.8-CY	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Cyclique	Concentrique
8	GFRP	34.9	G-34.9-CY	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Cyclique	Concentrique

### Fabrication des dalles d'essais

Le béton utilisé pour la fabrication des spécimens d'essai est un béton de chaussée type III-A de résistance >35 MPa comme préconisé par la norme 3101 du MTQ sur les bétons de masse volumique normale pour les ouvrages routiers. Le liant est de type GUb-SF

dosé à  $380 \text{ kg/m}^3$  avec un rapport  $E/C=0,42$  assurant une résistance à la flexion de 4,5 MPa à 28 jours. Les granulats (5 à 20 mm) sont de type calcaire. L'affaissement habituel de 40 à 60 mm pour une mise en place au train de pavage est corrigé à 80 mm pour une mise en place manuelle dans les coffrages. Le joint central pour les huit spécimens de cette Phase I a été réalisé à l'aide d'une plaque de contreplaqué compressible d'épaisseur 19,05 mm (3/4 po), maintenant les goujons en position durant le bétonnage.

Les dalles ont été fabriquées 2 par 2 dans un même coffrage en bois peint, imperméabilisé et huilé. Le levage des dalles est effectué au moyen de 4 étriers de levage en acier doux évitant de solliciter les joints en flexion ou torsion. Les dalles ont été fabriquées dans le laboratoire de structure de l'Université de Sherbrooke, comme illustré à la figure 2.4; deux gâchées de béton ont été utilisées pour fabriquer les huit spécimens de la Phase I. La résistance moyenne en compression mesurée sur des cylindres de  $100 \times 150 \text{ mm}$  est de  $38,0 \pm 3,1 \text{ MPa}$ .



Figure 2.5: Coffrage des dalles jointées, surfaçage et mûrissement

## **Base granulaire**

Lors des essais du premier projet de recherche (Montaigu et Coll., 2011), la base granulaire a été réalisée en 3 couches de 100 mm d'épaisseur de granulats calcaires, compactées à l'aide d'une plaque vibrante de 90 kg développant une force de compaction de 1,2 T afin d'obtenir un module de réaction du sol autour de 110 MPa/m. Cette valeur est celle prescrite par le MTQ pour les essais représentant une fondation rigide sous chaussée. Le mélange granulaire est réalisé selon les spécifications de l'AASHTO (base de classe A). Il est obtenu en mélangeant 50% de sable (0-5), 20% de pierre concassée de 10 mm (5-14) et 30% de pierre concassée de 20 mm (14-28). Les granulats sont mouillés avant mise en place pour une compaction optimale. La base ainsi formée est caractéristique de la dernière couche d'assise de chaussée sous pavage rigide. Elle est placée dans un bac réalisé avec des bastaings de section carrée de 4 x 4 po (101,6 x 101,6 mm). Une largeur périphérique supplémentaire de 12 po (304,8 mm), égale à l'épaisseur de la base, est ajoutée aux dimensions des spécimens permettant la répartition des charges dans la dalle du laboratoire sans solliciter les parois du conteneur. Les dimensions générales sont ainsi de 5 pieds x 11 pieds (1,524 x 3,353 m). Une fois la construction de la base granulaire complétée, un essai de compactage est réalisé à l'aide d'un appareil *Briaud Compaction Device* (BCD) de la compagnie Roctest Ltée de St-Lambert (Québec) pour la mesure du module de réaction du sol dont la valeur obtenue est autour de 110 MPa/m.

Dans cette Phase I du présent projet de recherche, les deux premiers spécimens (G-31.8-1 and G-34.9-1) ont été testés avec une base granulaire similaire à celle décrite ci-dessus avec cependant des grosseurs de granulats différentes, ce qui a résulté en un module de réaction beaucoup plus faible que 110MPa/m. La base granulaire a été reconstruite et les six autres spécimens de dalles jointées ont été testées avec une base granulaire identique à celle du projet précédant ayant un module de réaction égal à 110 MPa/m.

## **Essais de chargement des spécimens**

La figure 2.6 montre une vue de l'essai de chargement adopté pour les spécimens d'essai de la Phase I. Cet essai est analogue à celui utilisé antérieurement (Montaigu et Coll., 2011). D'un côté, les spécimens G-31.8-1, G-31.8-2, G34.9-1, G-34.9-2 ont été testés sous charge statique monotone avec une charge appliquée de façon concentrique alors que les spécimens G-31.8-EC et G-34.9-EC ont été testés avec une charge appliquée excentrique. De l'autre côté, les spécimens G-31.8-CY et G-34.9-CY ont été testés sous charge cyclique pour 1 million de cycles pour des charges situées entre 10 and 50 kN. Ensuite les deux spécimens ont été testés sous charge statique jusqu'à rupture. La figure 2.7 montre la localisation de la charge concentrique et la charge excentrique.



Figure 2.6: Essai de chargement des spécimens de la Phase I

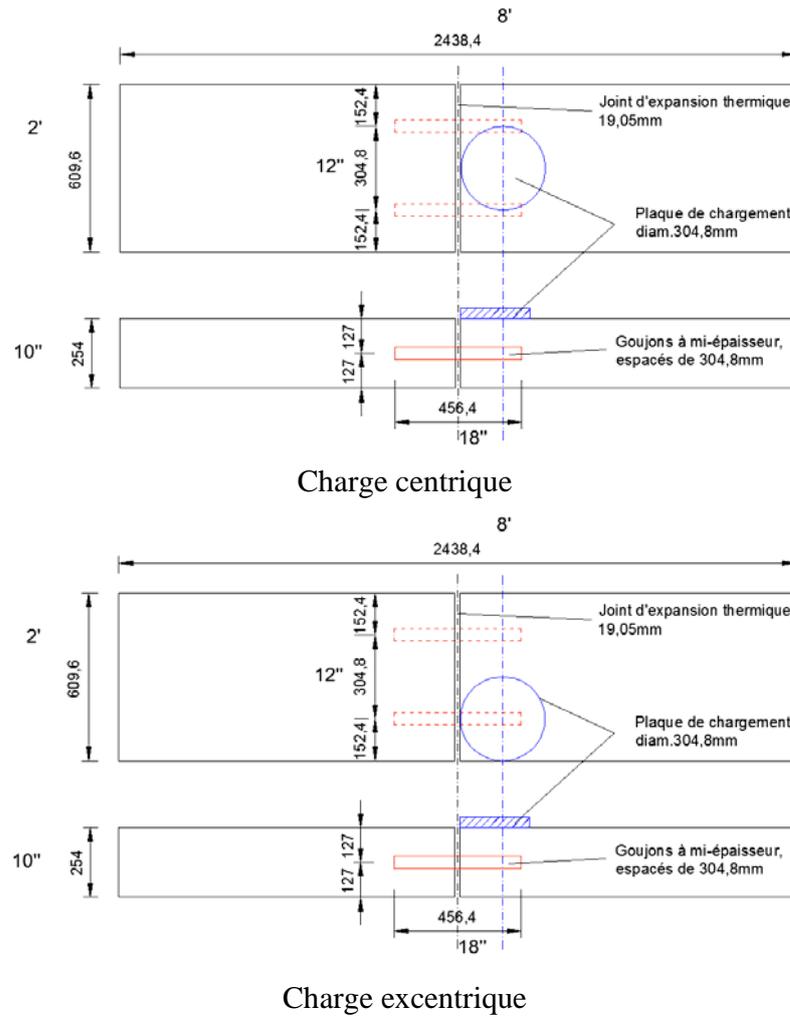


Figure 2.7: Localisation de la charge

## Résultats des essais

La fissuration des spécimens testés jusqu'à la rupture est montrée dans les figures 2.8 à 2.12. Les dalles montrent une fissuration typique qui s'est produite dans les zones chargées, aucune fissure n'a été relevée dans les zones non chargées. Les dalles ont présenté une charge de rupture très élevée, plus que 200 kN, comparativement à la charge de service qui est de 40 kN.





Figure 2.8: Réseau des fissures du spécimen G-31.8-2

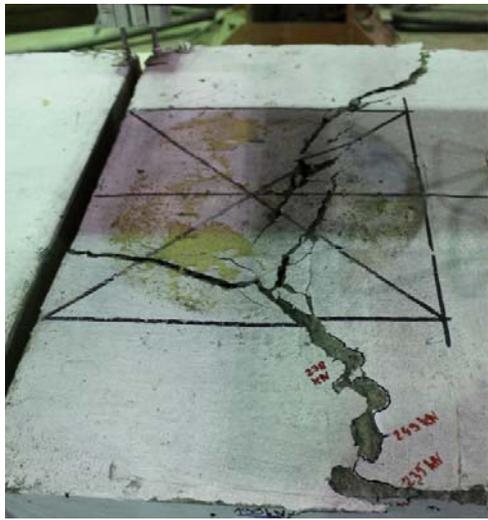




Figure 2.9: Réseau des fissures du spécimen G-34.9-2

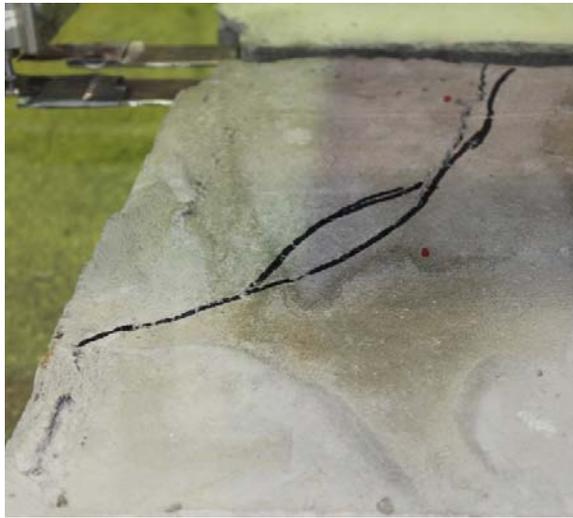


Figure 2.10: Réseau des fissures du spécimen G-34.9-EC



Figure 2.11: Réseau des fissures du spécimen G-31.8-CY



Figure 2.12: Réseau des fissures du spécimen G-34.9-CY

L'efficacité du joint ( $E$ ) et l'efficacité du transfert de charge ont été calculées en utilisant les équations 2.1 et 2.2 décrites plus haut. Les tableaux 2.2 and 2.3 présentent les valeurs obtenues pour  $E$  et  $LTE$  pour les spécimens testés sous charges statiques et charges cycliques, respectivement. Les résultats obtenus montrent des valeurs d'efficacité du joint ( $E$ ) supérieures à 75% pour tous les spécimens testés sous charge concentrique. Comme on s'y attendait, les spécimens testés sous charges excentriques ont présenté des valeurs d'efficacité du joint ( $E$ ) inférieures à celles des spécimens testés sous charges concentriques. Cependant, les valeurs de l'efficacité du joint ont été supérieures à la valeur de 75%, recommandée par l'AASHTO. Par ailleurs, les spécimens soumis à des charges cycliques jusqu'à 1 million de cycles ne montrent pas de baisse significative pour la valeur de l'efficacité du joint ( $E$ ), comme montré dans le tableau 2.3. Tous les résultats obtenus dans cette Phase d'essais I sont conformes aux recommandations de  $E > 75\%$  et  $LTE > 60\%$ .

Table 2.2: Valeurs de  $E$  et  $LTE$  des spécimens testés sous charges statiques

Spécimen	kN	LVDT 1		LVDT 2		Moyenne		Moyenne globale	
		$E$	$LTE$	$E$	$LTE$	$E (Av)$	$LTE (Av)$	$E$	$LTE$
G-31.8-1	40.0	95	91					94	89
	60.0	94	89						
	80.0	94	88						
G-31.8-2	40.0	93	86	89	81	91	84	90	81
	60.0	91	83	89	80	90	82		
	80.0	89	80	87	77	88	79		
G-31.8-EC	20.0	87	77					88	78
	40.0	88	79						
	60.0	89	79						
	80.0	87	76						
G-34.9-1	40.0	92	85					92	84
	60.0	92	85						
	80.0	91	84						
G-34.9-2	40.0	93	88	99	98	96	93	96	93
	60.0	95	90	99	97	97	94		
	80.0	95	90	98	96	96	93		
G-34.9-EC	20.0	85	74					86	76
	40.0	87	78						
	60.0	87	77						
	80.0	86	76						

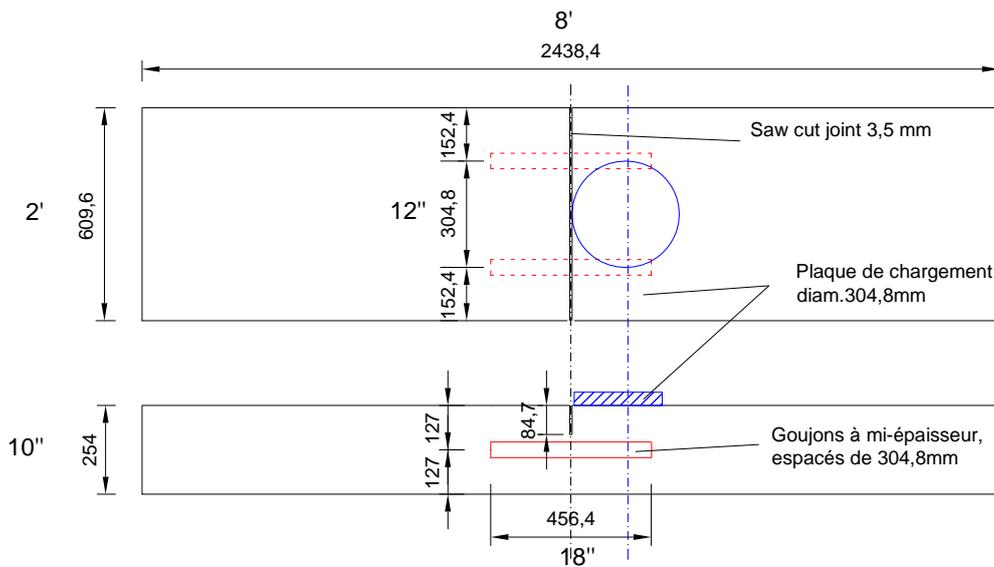
Tableau 2.3: Valeurs de  $E$  et  $LTE$  pour les spécimens testés sous charges cycliques

Nombre de cycles à 40 kN	G-31.8-CY		G-34.9-CY	
	$E$	$LTE$	$E$	$LTE$
0 cycle	98	96	92	86
100000	87	77	93	87
200000	94	89	92	85
300000	93	88	92	86
400000	88	78	93	86
500000	90	82	92	84
600000	88	79	92	85
700000	87	77	93	86
800000	87	77	93	87
900000	92	85	92	86
1000000	91	84	92	86

### 4.3 Spécimens d'essais de la Phase II et résultats

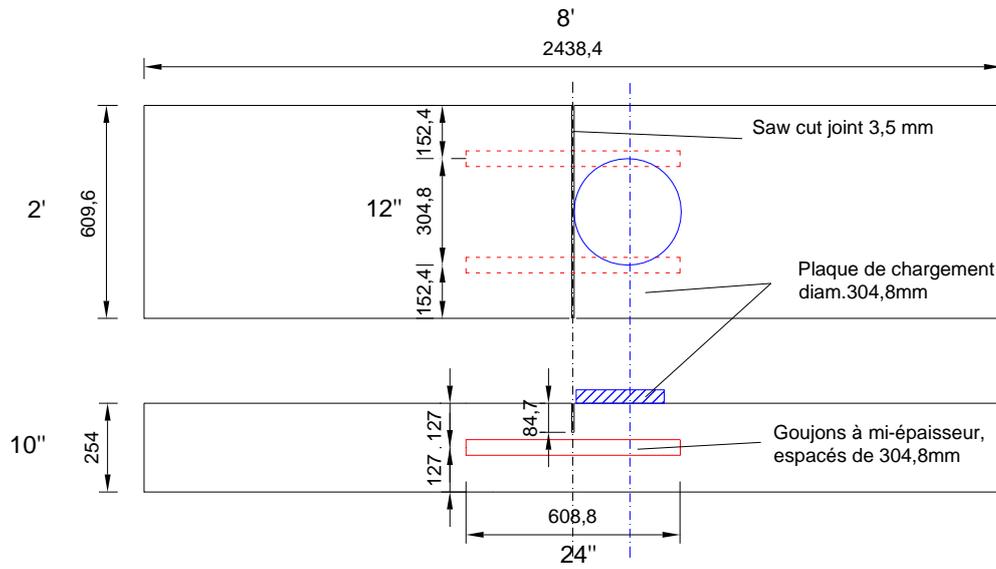
La deuxième phase (Phase II) du projet de recherche comprend douze spécimens de dalles jointées ayant toutes une ouverture du joint de 3,5 mm. Contrairement aux spécimens de la Phase I, les spécimens de la Phase II ont été coulés sans joint. Après le mûrissement du béton, les spécimens ont été sciés au milieu dans le sens transversal jusqu'à une profondeur équivalente au tiers de l'épaisseur de la dalle. Cette procédure est analogue à celle qui se fait sur les chantiers afin de simuler le comportement réel de dalles jointées de chaussées d'autoroutes au Québec.

De nombreux paramètres d'étude ont fait l'objet de cette Phase II en vue d'optimiser le design des dalles jointées de PRFV. En plus de la configuration standard (goujons de longueur de 18 pouces espacés à 12 pouces, cette phase d'étude comprend des spécimens avec trois goujons espacés à 9 pouces (230 mm) et des spécimens avec des goujons de PRFV de 24 pouces de long. La figure 2.13 montre les différentes configurations des spécimens d'essais de la Phase II; d'autres détails sur les douze spécimens sont aussi présentés dans le tableau 2.

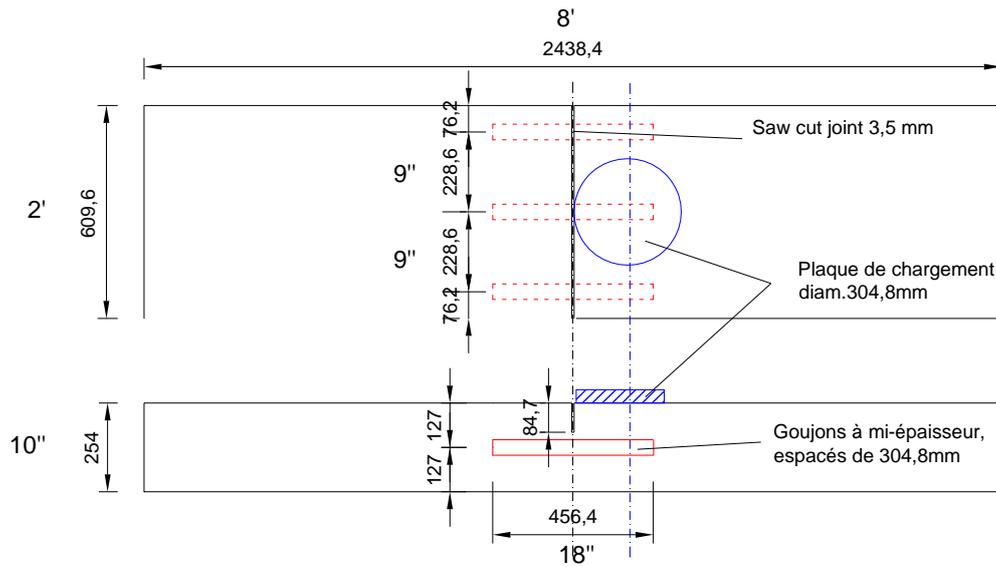


(a) Configuration standard (goujons de 18 po. de long espacés à 12 po.)

Figure 2.13: Détails des spécimens d'essais de la Phase II



(b) Goujons de 24 po. de long espacés à 12 po.



(c) Goujons de 18 po. de long espacés à 9 po.

Figure 2.13 (Suite): Détails des spécimens d'essais de la Phase II

Table 2.4: Détails des spécimens de dalles jointées de la Phase II

Dalle No.	Type de goujon	Diamètre du goujon	No du spécimen	Espacement des goujons	Longueur du goujon	Type de charge	Position de la charge
1	PRFV	31.8	G-31.8	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
2	PRFV	34.9	G-34.9	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
3	PRFV	38.1	G-38.1	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
4	PRFV	41.3	G-41.3	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
5	Acier	38.1	S-38.1	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
6	PRFV	44.5	G-44.5	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
7	Acier	31.8	S-31.8	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
8	Acier	34.9	S-34.9	12 po. (305 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
9	PRFV	31.8	G-31.8-L24	12 po. (305 mm)	24 po. (610 mm)	Statique	Concentrique
10	PRFV	34.9	G-34.9-L24	12 po. (305 mm)	24 po. (610 mm)	Statique	Concentrique
11	PRFV	31.8	G-31.8-S9	9 po. (230 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique
12	PRFV	34.9	G-34.9-S9	9 po. (230 mm)	18 po. (458 mm)	Statique	Concentrique

### Fabrication des dalles d'essais

Les spécimens de la Phase II ont été fabriqués en utilisant les mêmes goujons de PRFV et d'acier que ceux de la Phase I. Les spécimens ont été fabriqués conformément aux exigences du MTQ en ce qui a trait au type de béton. Les figures 2.14 à 2.15 montrent des photos illustrant la fabrication des 12 spécimens qui sont de dimensions analogues à ceux testés auparavant. Après 28 jours de mûrissement, les spécimens ont été sciés comme montré à la figure 2.16. Tous les spécimens ont été fabriqués dans le laboratoire situé sur la rue Sauvé à Sherbrooke et ensuite transportés dans le laboratoire de structure de l'Université de Sherbrooke pour les essais structuraux, comme montré à la figure 2.17. Les dimensions de chaque spécimen sont: 2440 mm de long × 610 mm de large × 254 mm d'épaisseur [96 × 24 × 10 po.].



Figure 2.14: Vue des coffrages et de la mise en place des goujons



Figure 2.15: Coulage du béton pour la fabrication des spécimens d'essais de la Phase II



Figure 2.16: Sciage des dalles d'essai au tiers de la profondeur (ouverture 3,5 mm)



Figure 2.17: Transport des spécimens d'essais du laboratoire Sauvé à l'université

## Base granulaire

La base granulaire a été préparée de façon similaire à celle des essais antérieurs, comme montré à la figure 2.18 et ce en utilisant les mêmes matériaux et méthode de mise en place. La valeur du module de réaction du sol est autour de 110 MPa/m.



Figure 2.18: Préparation de la base granulaire dans le laboratoire de structure

## Essais de chargement des spécimens

La figure 2.19 montre une vue de l'essai de chargement tel que réalisé dans le laboratoire de structures. Un vérin hydraulique d'une capacité de 1500 kN connecté à une pompe manuelle; la charge a été appliquée à un taux de chargement correspondant à 5 kN/mn.



Figure 2.19: Essai de chargement des spécimens de la Phase II

### Résultats des essais

La figure 2.20 montre le réseau de fissures des spécimens testés. On peut voir que ce réseau de fissures est semblable à celui observé lors des essais précédents. Dans la plupart des cas, la fissure apparaît proche ou au joint. Ceci montre que les goujons contribuent pleinement au transfert de la charge entre les deux dalles du spécimen d'essai. Aussi, on peut constater que lorsqu'une fissure apparaît en dehors de la zone jointée à des charges élevées, la dalle se sépare en deux morceaux distincts à la rupture.

Les flèches enregistrées à l'aide des LVDT ont été utilisées pour le calcul des valeurs de l'efficacité du joint ( $E$ ) et de l'efficacité du transfert de la charge ( $LTE$ ). Les valeurs obtenues pour ( $E$ ) et ( $LTE$ ) pour des charges équivalentes à la charge de service (40kN), à 1,5 fois la charge de service (60 kN) et à 2 fois la charge de service (80 kN) sont présentées dans le tableau 2.5. On constate que toutes les valeurs obtenues sont autour de 100%, donc bien au-delà de la valeur recommandée pour le design (75%).

En comparaison des essais précédents, les spécimens d'essais de la Phase II montrent donc une valeur très élevée pour l'efficacité du joint ( $E$ ). Les joints sciés sont assez performants pour résister et transférer des charges appliquées très supérieures à la charge de service avec une efficacité de 100%. Par ailleurs, lorsque la fissure apparaît proche ou au joint, elle n'affecte aucunement l'efficacité. Aussi, l'ouverture du joint de 3,5 mm a réduit la déformation du goujon au joint ce qui a contribué à une efficacité du joint ( $E$ ) supérieure.

Ces résultats montrent très clairement que des goujons de PRFV et d'acier de même grosseur ont une même valeur d'efficacité du joint ( $E$ ) pour une charge appliquée analogue. En considérant le paramètre d'efficacité du joint pour le design, on en conclut que les goujons de PRFV testés dans le cadre de ce projet de recherche peuvent donc être utilisés en remplacement de ceux d'acier en conservant la même grosseur (ou diamètre).

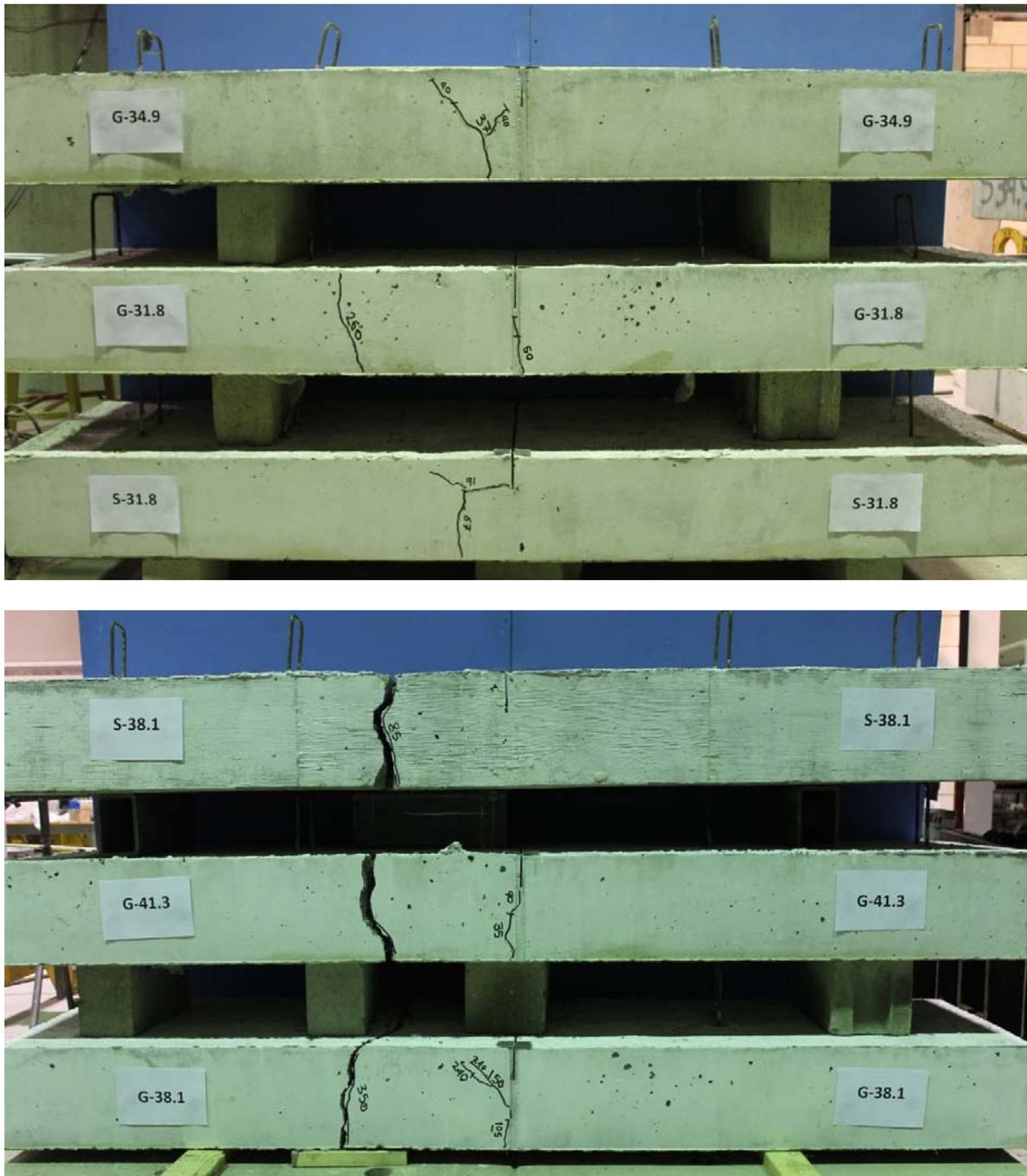


Figure 2.20: Réseau des fissures des spécimens testés



Figure 2.20 (Suite): Réseau des fissures des spécimens testés

Table 2.5: Valeurs de  $E$  et  $LTE$  des spécimens testés dans la Phase II

Spécimen	kN	LVDT 1		LVDT 2		Moyenne		Moyenne globale	
		$E$	$LTE$	$E$	$LTE$			$E$	$LTE$
<b>G-31.8</b>	40.0	99	98	101	103	100	100	<b>100</b>	<b>101</b>
	60.0	100	100	101	102	101	101		
	80.0	100	100	101	102	100	101		
<b>G-34.9</b>	40.0	99	99	103	106	101	102	<b>101</b>	<b>102</b>
	60.0	99	99	103	106	101	102		
	80.0	99	98	103	106	101	102		
<b>G-38.1</b>	40.0	99	97	104	108	101	103	<b>101</b>	<b>102</b>
	60.0	98	97	104	108	101	102		
	80.0	98	96	104	108	101	102		
<b>G-41.3</b>	40.0	101	102	101	101	101	102	<b>101</b>	<b>101</b>
	60.0	101	102	100	101	101	101		
	80.0	100	101	100	101	100	101		
<b>G-44.5</b>	40.0	101	102	101	102	101	102	<b>104</b>	<b>109</b>
	60.0	97	95	110	123	104	109		
	80.0	96	93	117	141	107	117		
<b>S-31.8</b>	40.0	99	97	102	104	100	101	<b>101</b>	<b>102</b>
	60.0	100	101	102	105	101	103		
	80.0	100	100	102	104	101	102		
<b>S-34.9</b>	40.0	95	91	103	107	99	99	<b>99</b>	<b>99</b>
	60.0	96	92	103	106	99	99		
	80.0	95	91	104	107	99	99		
<b>S-38.1</b>	40.0	100	101	102	104	101	102	<b>100</b>	<b>101</b>
	60.0	101	101	100	100	100	101		
	80.0	101	102	99	98	100	100		
<b>G-31.8-L24</b>	40.0	102	104	102	104	102	104	<b>101</b>	<b>103</b>
	60.0	100	101	101	102	101	101		
	80.0	100	101	103	106	102	103		
<b>G-34.9-L24</b>	40.0	100	101	105	111	103	106	<b>103</b>	<b>106</b>
	60.0	102	104	105	110	103	107		
	80.0	101	102	104	108	102	105		
<b>G-31.8-S9</b>	40.0	94	89	103	106	98	97	<b>100</b>	<b>101</b>
	60.0	97	94	105	110	101	102		
	80.0	97	94	105	111	101	102		
<b>G-34.9-S9</b>	40.0	102	104	102	103	102	104	<b>102</b>	<b>103</b>
	60.0	102	104	101	103	102	103		
	80.0	102	103	101	102	101	103		

## Chapitre 3. Conclusions et recommandations

### Conclusions

Ce projet de recherche (devis No R679.P2), en continuité du projet de recherche précédant (devis No R679.P1), visait à optimiser le design de dalles de chaussées en béton jointées avec des goujons en matériaux composites en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) à l'aide d'essais structuraux additionnels afin de proposer les bonnes dimensions du goujon en PRFV à utiliser dans les dalles de chaussées en béton jointées des autoroutes au Québec. En optimisant la grosseur et le nombre de goujons de PRFV à utiliser, on pourra ainsi réduire le coût des dalles courtes goujonnées avec PRFV qui pourrait devenir moins cher que celui avec des goujons d'acier.

Le projet de recherche comprenait deux Phases d'étude :

1. Une première phase (Phase I) comprenant huit spécimens de dalles jointées ayant toutes une ouverture du joint de 19,05 mm.
2. Une deuxième phase (Phase II) comprenant douze spécimens de dalles jointées ayant toutes une ouverture du joint de 3,5 mm sur 85 mm de profondeur.

Les vingt (20) spécimens de dalles jointées qui ont été fabriqués et testés. Plusieurs paramètres ont fait l'objet de l'étude dont : 1) le diamètre du goujon (31,8 mm, 34,9 mm, 38,1 mm, 41,3 mm et 44,5 mm pour le PRFV et 31,8 mm, 34,9 mm et 38,1 mm pour l'acier), 2) la longueur des goujons (458 mm et 610 mm), 3) l'espacement entre les goujons (305 mm et 230 mm), 4) l'ouverture du joint des dalles : 19,05 mm (joint à froid) et 3,5 mm (joint scié au tiers de l'épaisseur de la dalle, comme réalisé sur le terrain), 5) le type de goujon (PRFV et acier), et 6) le type de chargement (statique et cyclique).

Les conclusions suivantes peuvent être émises :

### Essais de la Phase I

- À des charges appliquées égales à 40, 60, et 80 kN, correspond respectivement à 1,0, 1,5, et 2,0 fois la charge de service, les goujons de PRFV de diamètres de 31,8 et 34,9 mm ont montré une valeur de l'efficacité du joint ( $E$ ) bien supérieure à la valeur recommandée pour le design, soit 75%, recommandée par l'AASHTO.
- Les spécimens testés sous charges excentriques ont présenté des valeurs d'efficacité du joint ( $E$ ) inférieures à celles des spécimens testés sous charges concentriques. Cependant, les valeurs de l'efficacité du joint sont demeurées toujours supérieures à la valeur de 75%.
- Les spécimens soumis à des charges cycliques jusqu'à 1 million de cycles n'ont montré aucune baisse significative de la valeur de l'efficacité du joint ( $E$ ).

- Tous les spécimens testés dans la Phase d'essais I sont conformes aux recommandations de l'AASHTO, soit  $E > 75\%$  et  $LTE > 60\%$

### **Essais de la Phase II**

- Les 12 spécimens d'essais de la Phase II ont montré une valeur très élevée pour l'efficacité du joint ( $E$ ). Cependant, il faut noter que seulement deux échantillons sur les 12 testés ont été fissurés sur toute l'épaisseur de la dalle dans le joint au droit du trait de scie de 3,5 mm. Il est toutefois clair que les dalles avec des joints sciés de 3,5 mm sont beaucoup plus performantes que celles avec joint de 19 mm pour résister et transférer des charges appliquées largement supérieures à la charge de service et ce en gardant une efficacité de joint de 100%.
- Les goujons de PRFV espacés à 9 pouces ainsi que ceux de longueur de 24 pouces n'ont pas montré un changement significatif du comportement du joint. L'efficacité du joint ( $E$ ) était semblable à celle des goujons de configuration standard (goujons de PRFV de 18 pouces de long et espacés à 12 pouces).

### **Recommandations**

Sur la base des résultats obtenus dans le cadre des deux projets de recherche (devis No R679.P1 et devis No R679.P2), il est recommandé au MTQ de considérer l'utilisation à grande échelle des goujons en matériaux composites de PRFV à base de résine vinylester dans les chaussées en béton des routes et autoroutes de la province. Le goujon de PRFV doit être conforme aux spécifications émises dans le rapport précédent (2011).

L'utilisation de goujons de PRFV de même grosseur que ceux d'acier est recommandée pour le ministère. Cependant, cette recommandation doit être validée à l'aide d'essais sur le terrain avant son application par le ministère (MTQ). Pour ce faire, 5 paniers avec des goujons de 38,1 mm et 5 autres paniers avec des goujons de 41,3 mm de PRFV (V-ROD de Pultrall) ont été installés à l'automne 2013 dans un accotement de l'A-40 entre St-Charles et le pont de l'Île aux Tourtres pour des essais. Aussi, il est recommandé au ministère de réaliser la série d'essais suivante au laboratoire : 2 dalles avec goujons de PRFV de 38,1 mm; 2 dalles avec goujons de PRFV de 41,3 mm et 2 dalles avec goujons d'acier de 38,1 mm afin de compléter ceux effectués sur le terrain. Les résultats de ces essais sur le terrain et en laboratoire permettront au ministère l'établissement de directives de conception définitives pour les dalles de chaussées en béton jointées avec des goujons en matériaux composites de PRFV.

## Références

- AASHTO, 1993, "Guide for Design of Pavement Structures," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Benmokrane, B., Ahmed, E.A., Montaigu, M., and Thebeau, D., 2013, "Performance of GFRP-Doweled Jointed Plain Concrete Pavement under Static and Cyclic Loadings," *ACI Structural Journal*, 39 p. (Sous-pressé).
- Davis, D., and Porter, M.L., 1998, "Evaluation of Glass Fiber Reinforced Polymer Dowels as Load Transfer Devices in Highway Pavement Slabs," *Proc. of Transportation Conference*, pp. 78-81.
- Eddie, D., Shalaby, A., and Rizkalla, S., 2001, "Glass Fiber-Reinforced Polymer Dowels for Concrete Pavements," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 2, pp. 201-206.
- FRP Dowel Bar Team (DBT), 1998, "Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composite Dowel Bars-a 15 Years of Durability Study," Market Development Alliance, Composites Institute, Harrison, NY, USA, 18 p.
- Ioannides, A.M., and Korovesis, G.T., 1992, "Analysis and Design of Doweled Slab-on-Grade Pavement Systemes," *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 6: pp. 745-768.
- Maitra, S.R., Reddy, K.S., Ramachandra, L.S., 2009, "Load Transfer Characteristics of Dowel Bar System in Jointed Concrete Pavement," *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 11, pp. 813-821.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ), 2009a, "Bétons de masse volumique normale," Norme 3101, Ministère des Transports du Québec, Québec, Canada, 8 p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ), 2009b, "Bulletin Innovation Transport," No. 34, Ministère des Transports du Québec, Québec, 42 p.
- Montaigu, M., Robert, M., Ahmed, E., and Benmokrane, B., 2013, "Laboratory Characterization and Evaluation of the Durability Performance of New Polyester and Vinylester E-glass GFRP Dowels for Jointed Concrete Pavement," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 17, No. 2, pp. 176-187.
- Montaigu, M., Robert, M., Ahmed, E., and Benmokrane, B., 2011, "Plan d'essais de caractérisation de goujons en acier et en matériaux composites de PRFV pour des dalles de chaussées en béton" Rapport technique soumis au MTQ, Mai, 152 p.
- Porter, M.L., 2005, "Structural Dowel Bar Alternative and Gaps of Knowledge," *Proceedings of the Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, Iowa, August, 13 p.
- Porter, M.L., Davis, D., Guinn, R., Lundy, A., and Rohner, J., 2001, "Investigation of Glass Fiber Composite Dowel Bars for Highway Pavement Slabs," Final Report, TR-408 Submitted to Highway Division of the Iowa Department of Transportation and Iowa Highway Research Board. Iowa State University, Engineering Research Institute, IA.
- Shoukry, S.N., William, G.W., and Riad, M., 2002, "Characteristics of Concrete Contact Stresses in Doweled Transverse Joints," *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 117-129.
- Smith, K.D., 2001, "Alternative Dowel Bars for Load Transfer in Jointed Concrete Pavements," FHWA Technical Report Draft, Washington, DC, USA, 16 p.

- Westergaard, H.M., 1928, "Spacing of Dowels," Proceedings of the Highway Research Board, Transportation Research Board, Washington D.C., No. 8, pp. 154-158.
- William, G.W., and Shoukry, S.N., 2001, "3D Finite Element Analysis of Temperature Induced Stresses in Dowel Jointed Concrete Pavements," *International Journal of Geomechanics*, Vol. 1, No. 3, pp. 291-307.