



INFRA 2011

Ville de Québec, 7 au 9 novembre 2011

CARACTÉRISATION DE GOUJONS EN MATÉRIAUX COMPOSITES DE PRFV POUR LES DALLES DE CHAUSSÉE EN BÉTON

Brahim Benmokrane, ing., Ph.D., FACI, FSCGC

Professeur titulaire

Chaire de recherche du Canada sur les matériaux composites pour les structures de génie civil

Chaire de recherche du CRSNG sur les renforcements de PRF pour les structures en béton

Directeur du Centre de recherche sur les infrastructures en béton

Département de génie civil

Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec



Plan de la présentation :

- Introduction
- Problématique / Objectifs du projet
- Programme et résultats expérimentaux
 - Phase I : Caractérisation mécanique et physique
 - Phase II : Durabilité
 - Phase III : Analyse structurale
- Conclusions

Introduction

Les chaussées rigides en béton



Dalle BAC A-40 MTL



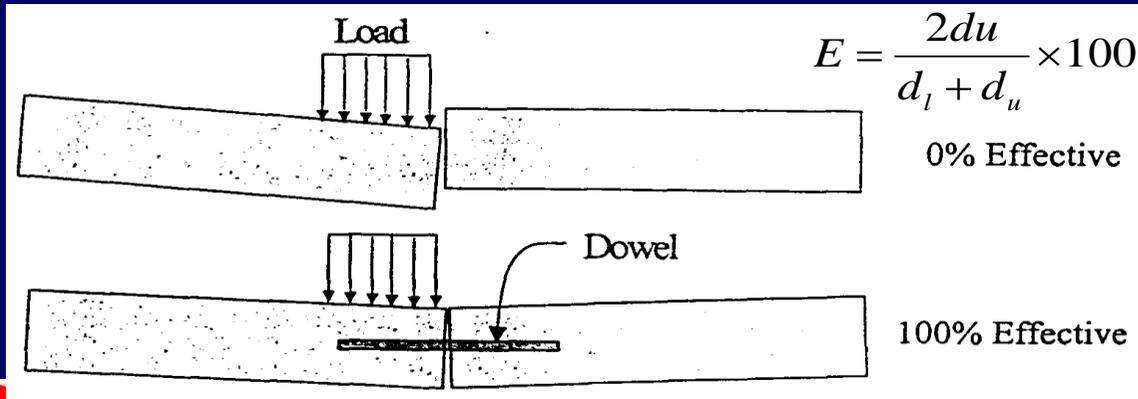
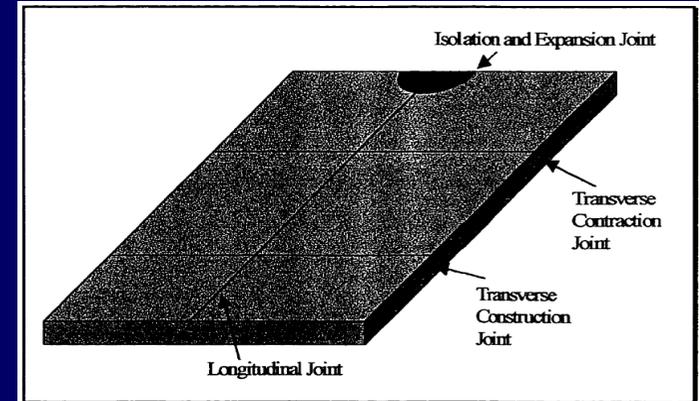
Dalles courtes goujonnées A-30

Introduction

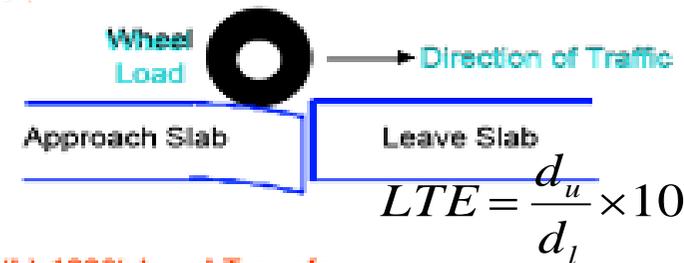
Le système joint/goujons

Bonne performance du pavage :

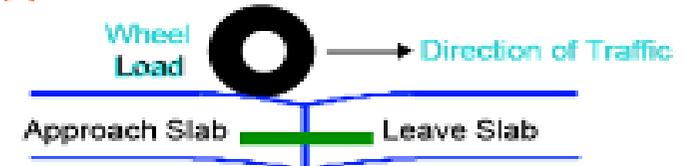
- Relâchement des contraintes lors du retrait ;
- Permettre les dilatations thermiques ;
- Conserver l'alignement horizontal et vertical des dalles ;
- Transfert de charge.



(a) 0% Load Transfer



(b) 100% Load Transfer



Introduction

Le système joint/goujons



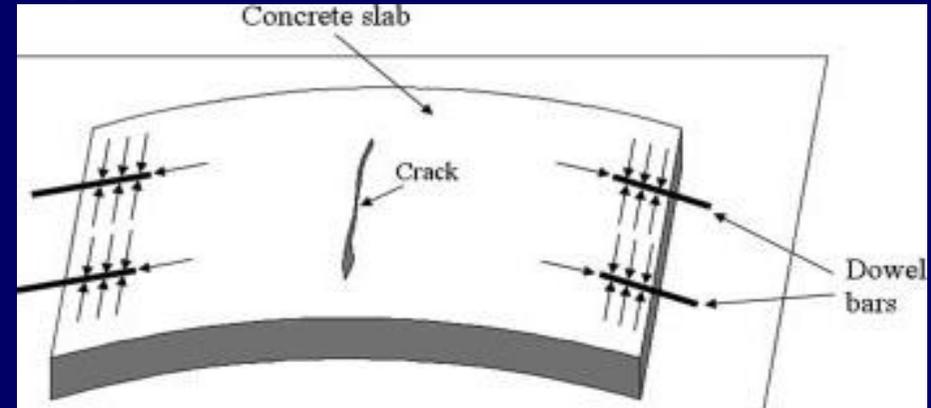
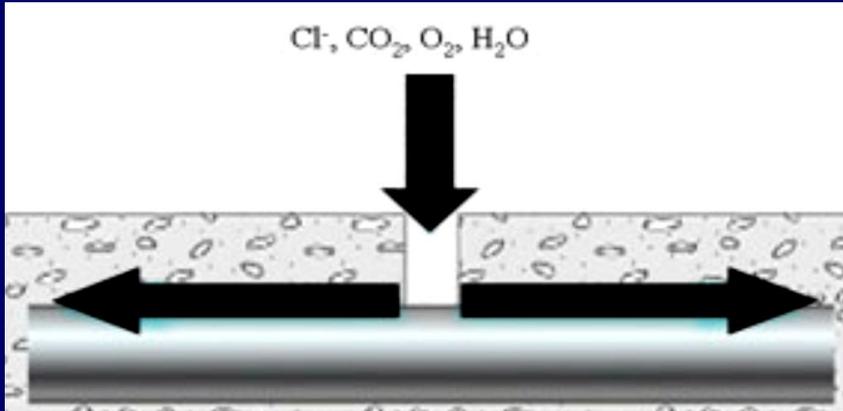
Goujons acier A-30 2010



Goujons PRFV A-40 acc 2006

Introduction

Contexte d'exploitation



- Conditions environnementales très rudes + sels de déglacage (>65T/km/an) **CORROSION**
- Conséquences :
 - Dégradation prématurée du béton, verrouillage, soulèvement, cloquage ;
 - Perte de section efficace, réduction de la charge transmise ;
 - Réduction du cycle de vie de la structure par rapport au design initial ;
 - Coûts de maintenance élevés, impact sur les usagers.
- *1^{ère} cause de dégradation prématurée des chaussées rigides (ACPA)*
- *Relevés sur structures existantes => 7 à 15 ans, acier fortement affecté par la corrosion*

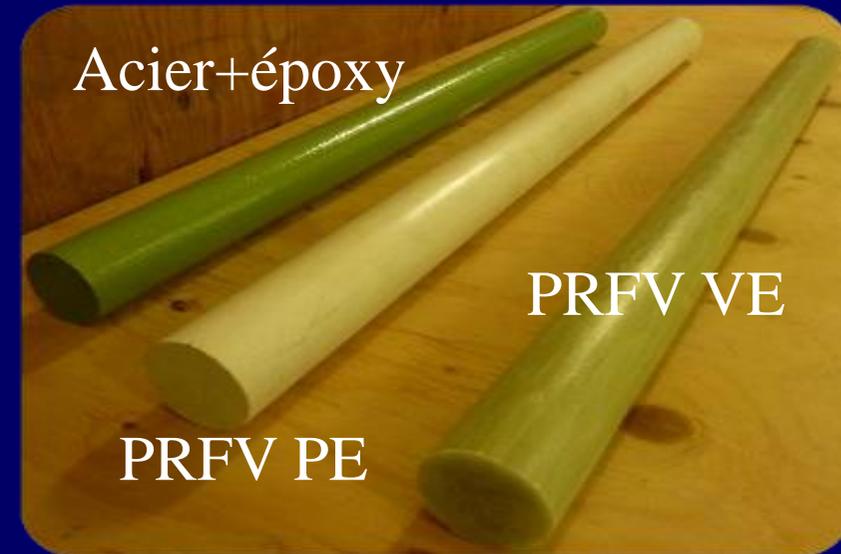
Problématique / Objectifs

- Conception de structures sécuritaires, durables et économiques
- Corrosion persistante malgré l'époxy, voire aggravée



- Acier inoxydable très onéreux

- *Goujons de PRFV solution sans corrosion :*



- Nécessité de caractériser ces produits / Spécifications / Durabilité
- Proposer une méthode de design



Objectif du projet de recherche

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



Programme expérimental

- **Phase I : Caractérisation mécanique et physique**
 - Caractérisation des matériaux ;
 - Certifications ;
 - Données pour le design.

- **Phase II : Durabilité**
 - Intégrité des matériaux sous conditions de service (gel/dégel, agressions chimiques) ;
 - Intégrité des matériaux à long terme (vieillessement accéléré).

- **Phase III : Analyse structurale**
 - Méthode de design adaptée aux goujons de PRFV ;
 - Comportement structural en service.

Programme expérimental

Produits de PRFV

résine	diamètre (mm)	diamètre (po)
Vinylester	25,4	1
	28,6	1 ^{1/8}
	31,8	1 ^{1/4}
	34,9	1 ^{3/8}
	38,1	1 ^{1/2}
	41,3	1 ^{5/8}
	44,5	1 ^{3/4}
Polyester	25,4	1
	28,6	1 ^{1/8}
	31,8	1 ^{1/4}
	34,9	1 ^{3/8}



- Introduction
- Problématique / Objectifs
- **Programme et résultats expérimentaux**
 - **Phase I : Caractérisation mécanique et physique**
 - Phase II : Durabilité
 - Phase III : Analyse structurale
- Conclusions / Travaux Futurs

Phase I

Caractérisation mécanique et physique

- Cisaillement direct [ACI 440.3R-04] :
 - 160-200 MPa résine vinylester ;
 - 150-165 MPa résine polyester ;
 - Pas de changements entre 20 et 70°C.
- Flexion par 4 points [ACI 440.3R-04] :
 - 1 000-1 325 MPa résine vinylester, module 50-55 GPa ;
 - 750-1 100 MPa résine polyester, module 50 GPa ;
 - Pas de changements entre 20 et 70°C.
- Cisaillement interlaminaire [ASTM D 4475-02] :
 - 53-60 MPa résine vinylester ;
 - 35-40 MPa résine polyester ;
- Propriétés physiques [CSA S807]



- Introduction
- Problématique / Objectifs
- **Programme et résultats expérimentaux**
 - Phase I : Caractérisation mécanique et physique
 - **Phase II : Durabilité**
 - Phase III : Analyse structurale
- Conclusions / Travaux Futurs

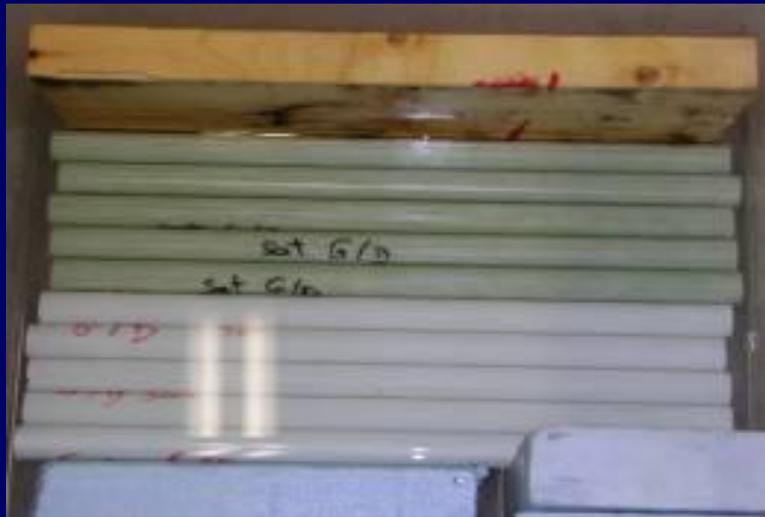
Phase II : Durabilité

Gel/Dégel

- 5 Goujons 25,4 mm PE et VE ; L = 300 mm
- ASTM C 666M – 03
« Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing »
- Résistance des goujons aux cisaillements direct et interlaminaire après 300 cycles
- *influence de l'absorption d'eau sur la résistance des fibres et de l'interface au gel/dégel*



Non conditionnés



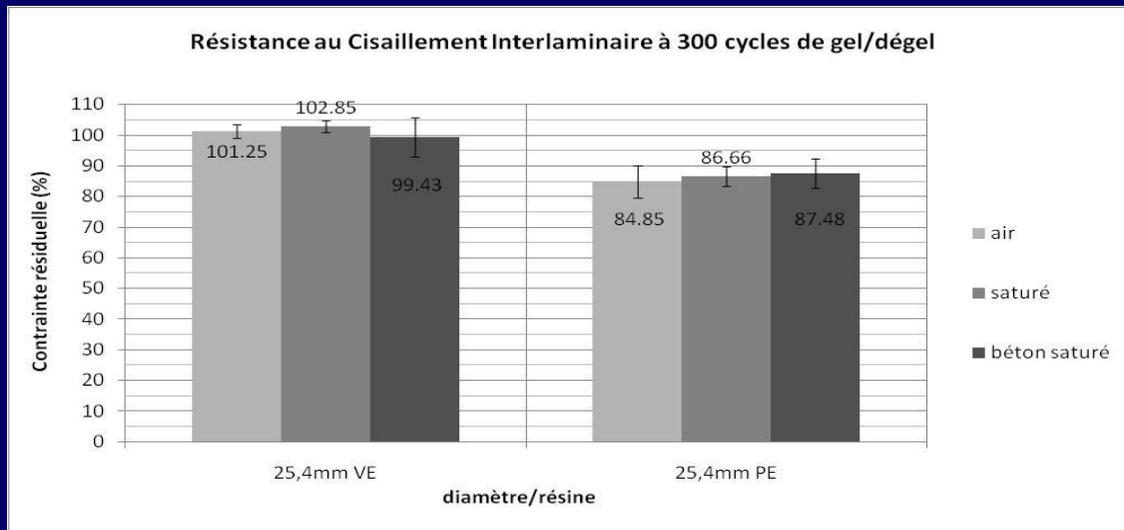
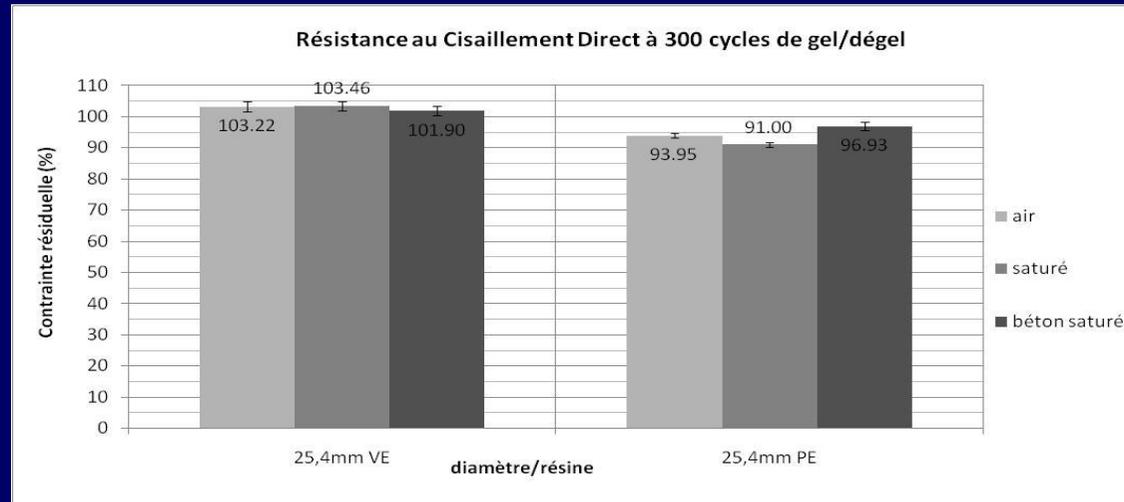
Saturés dans l'eau



Enrobés de béton à saturation

Phase II : Durabilité

Résultats Gel/Dégel

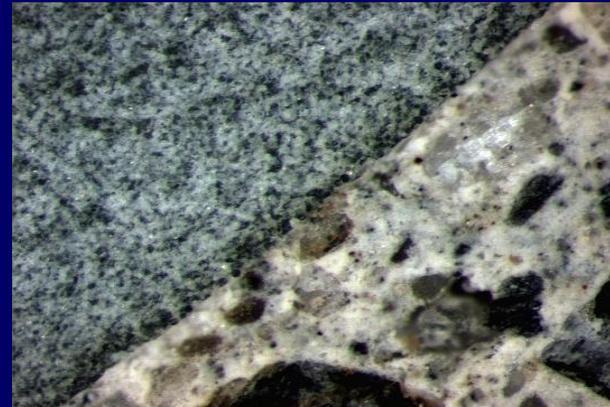


Phase II : Durabilité

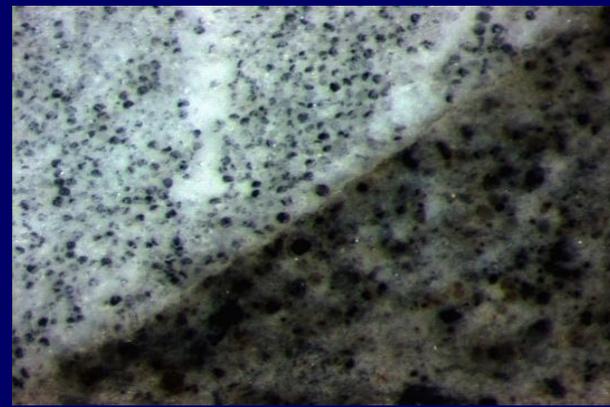
Résultats Gel/Dégel

- Excellente performance mécanique et physique de chaque résine – Interface plus affectée que les fibres.

Microscopies optiques sur l'interface goujons/béton:



Interface goujons VE/béton



Interface goujons PE/béton

Phase II : Durabilité

Résistance chimique

- Résistance des goujons aux agressions environnementales en service.
- 6 spécimens de 12 po (304,8 mm) par diamètre sont immergés durant 3 mois à 23°C :
 - eau d'aqueduc → témoin - pH 7,40 ;
 - solution à 3% CaCl_2 → sels déglçage > NaCl - pH 7,65 ;
 - solution à 3% NaOH → milieu très basique, ions hydroxydes - pH 13,75 ;
 - solution saturée en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ → eau de chaux - pH 12,65.



Phase II : Durabilité

Résultats Résistance Chimique

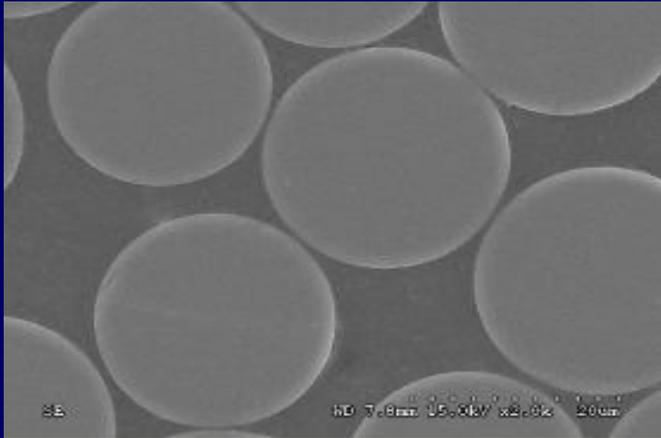
- Goujons PRFV/Vinylester :
 - 5% perte NaOH, \searrow Tg de 3%, aucun effet sur W% ;
 - Perte < 2% autres solutions, aucune dégradation physique ;

 - Goujons PRFV/Polyester :
 - 35% perte NaOH, \searrow Tg et E de 10%, \nearrow W% : 1,46-1,66% (+14%) ;
 - Perte = 12% autres solutions, aucune dégradation physique.
- *Hydrolyse NaOH – Plastification dans les autres solutions*

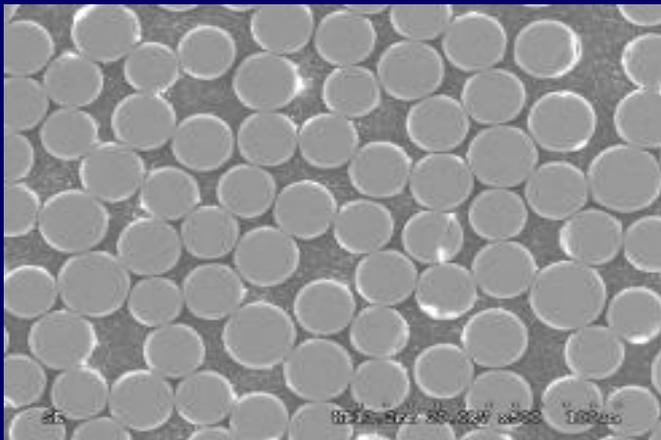
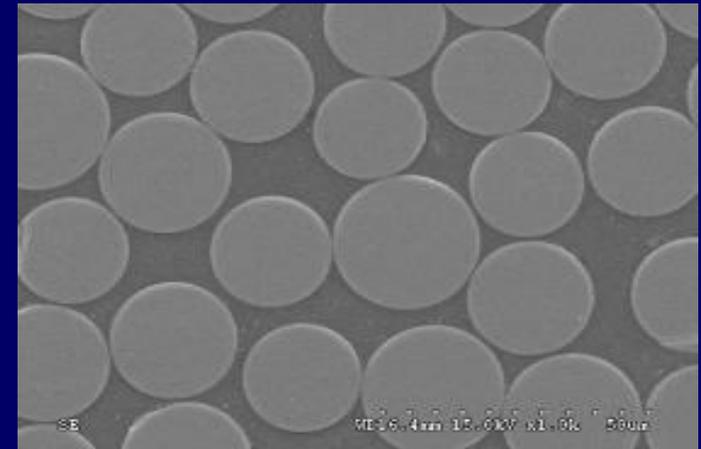
Phase II : Durabilité

Résultats Résistance Chimique

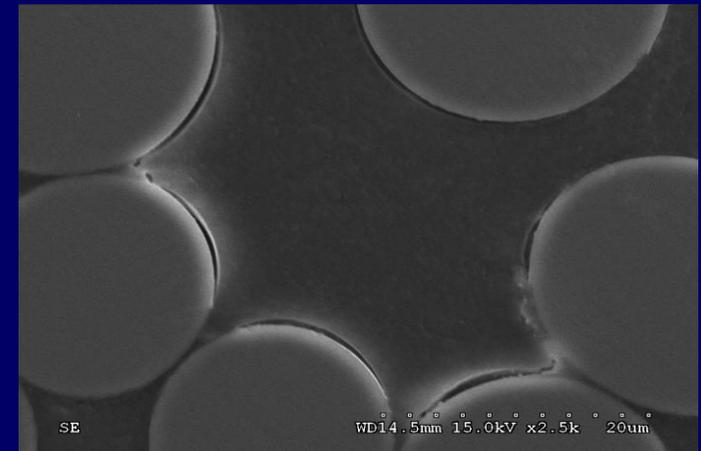
- *Observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB)*



**MEB sur goujons VE 25
Initial / 90 jours NaOH**



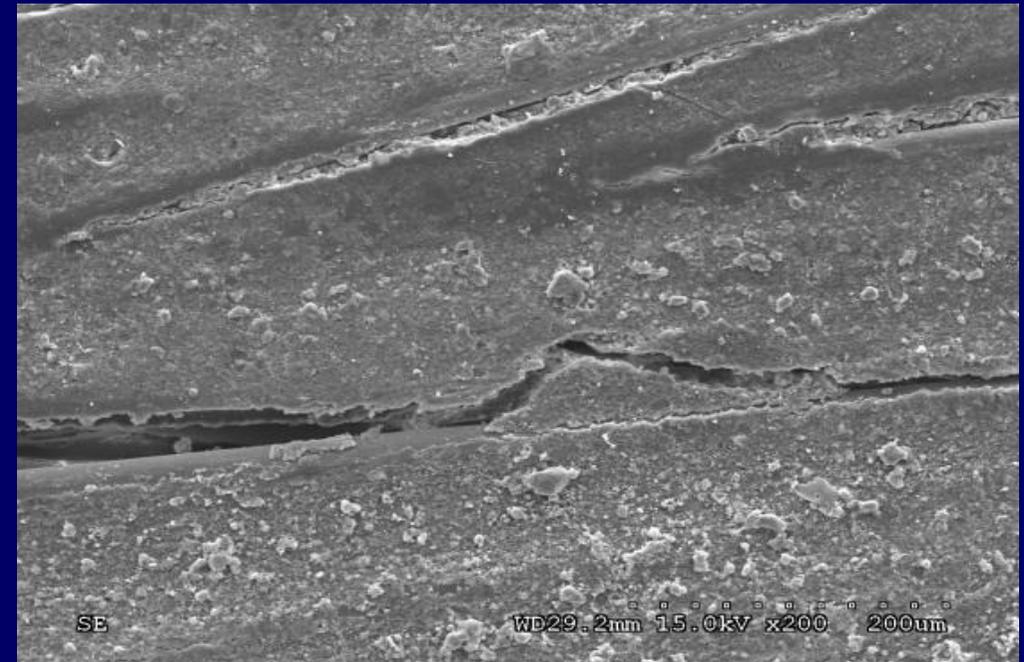
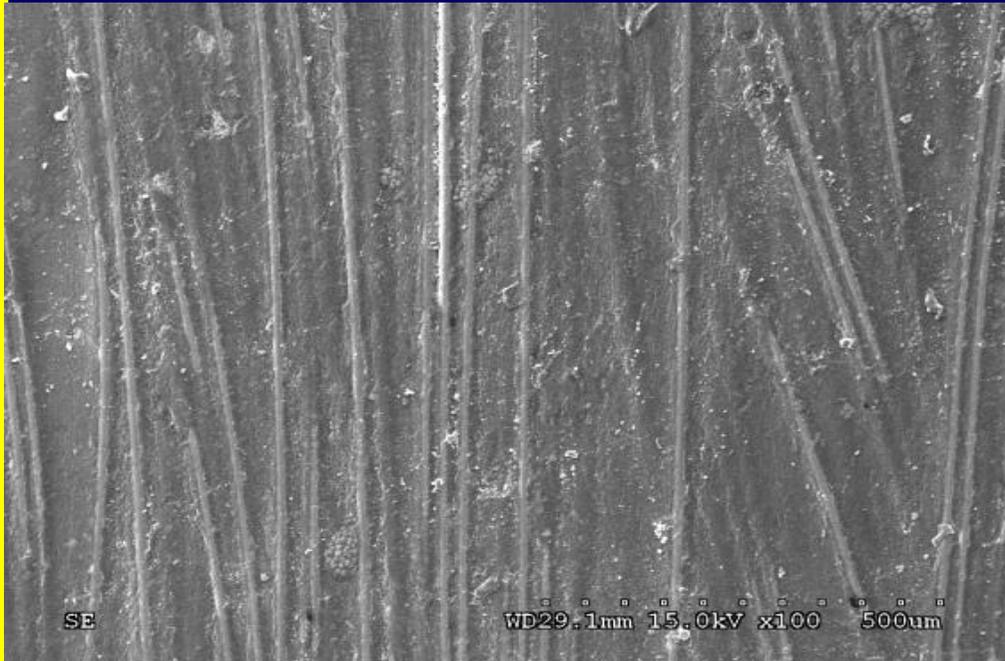
**MEB sur goujons PE 25
Initial / 90 jours NaOH**



Phase II : Durabilité

Résultats Résistance Chimique

- Observations de surface au Microscope Electronique à Balayage (MEB)



Phase II : Durabilité

Vieillessement accéléré

- **Caractériser les propriétés à long terme des goujons de PRFV**
 - Immersion en solution de ciment, représentative de l'eau interne du béton – pH 12,60
 - 4 spécimens/diamètre testés au cisaillement direct et à la flexion après immersion à 23, 50 et 60°C durant 30, 60 et 180 jours.



Phase II : Durabilité

Résultats *Vieillessement accéléré*

- Goujons PRFV/Vinylester :

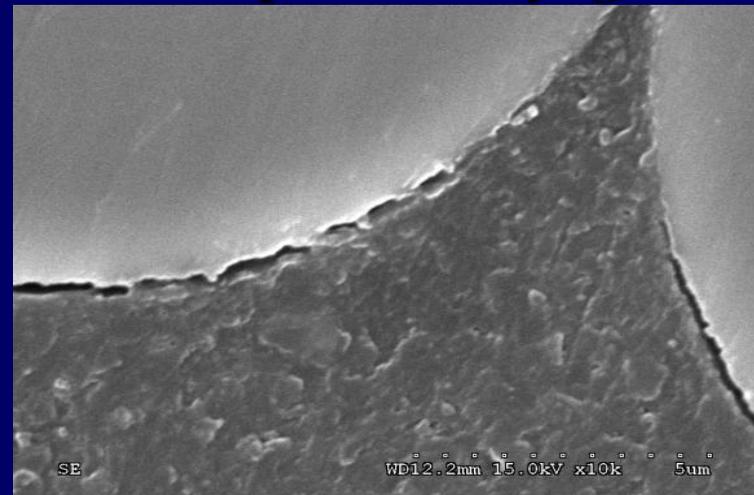
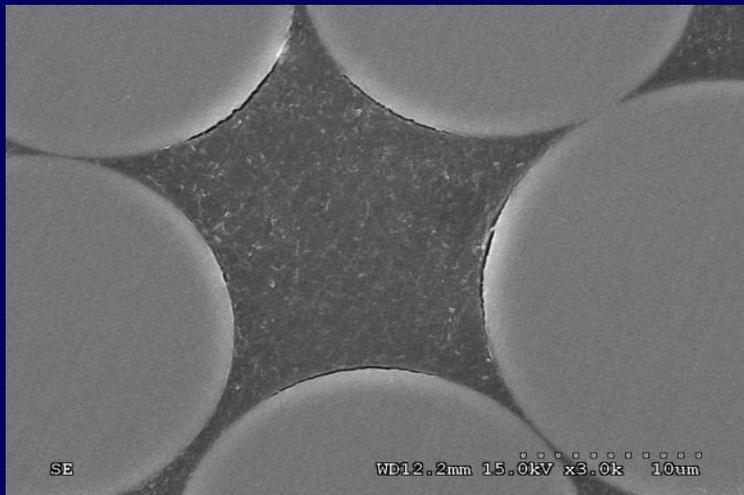
- 5 – 10% perte en flexion/cisaillement ;
- Aucune dégradation physique .

- Goujons PRFV/Polyester :

- **35 – 25% perte en flexion/cisaillement**
- *interface plus affectée*
- ↘ Tg et E de 5%, aucun effet sur W% .

➤ *Légère hydrolyse*

■ *Observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB)*



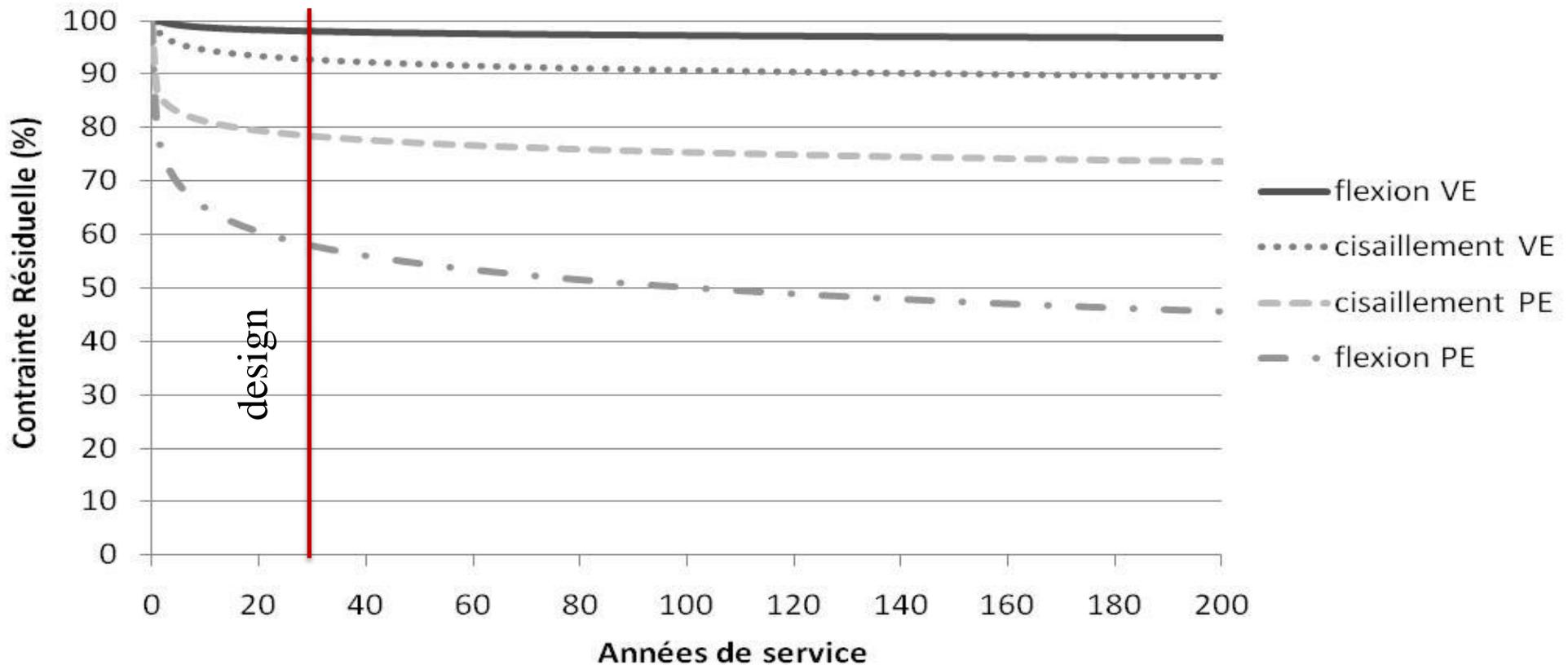
MEB sur goujon PE 25 après 180 J à 60°C



Phase II : Durabilité

Prédictions à long terme

Relation perte de contrainte mécanique vs durée de service à 6,2°C

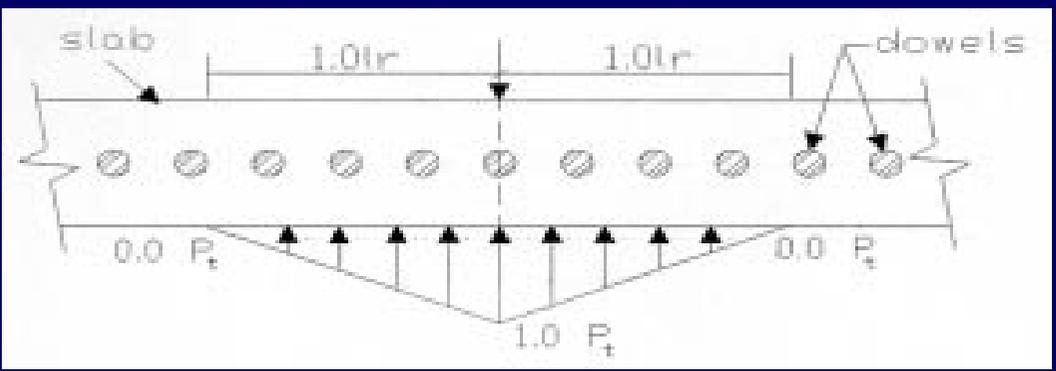


- Introduction
- Problématique / Objectifs
- **Programme et résultats expérimentaux**
 - Phase I : Caractérisation mécanique et physique
 - Phase II : Durabilité
 - **Phase III : Analyse structurale**
- Conclusions / Travaux Futurs

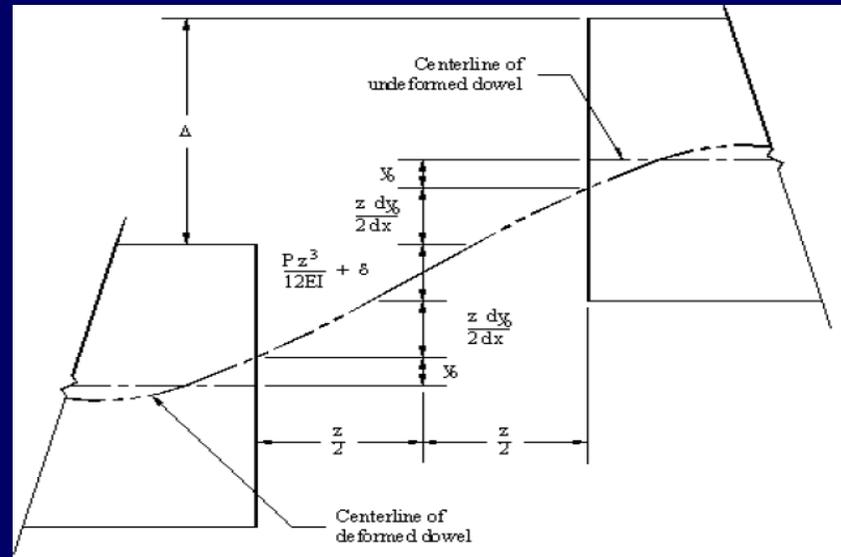
Phase III : Analyse structurale

Design

- Théorie des poutres semi-infinies sur base élastique [Friberg, 1940]
- Répartition de la charge / Goujon critique



[Davis., 1998]



[Porter et al., 2006]

$$l_r = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1 - \mu^2)k}}$$

Calcul de P_t

$$y_0 = \frac{P_t}{4\beta^3 EI} (2 + \beta z)$$

- **CHOIX : Limitation des contraintes autour du goujon**

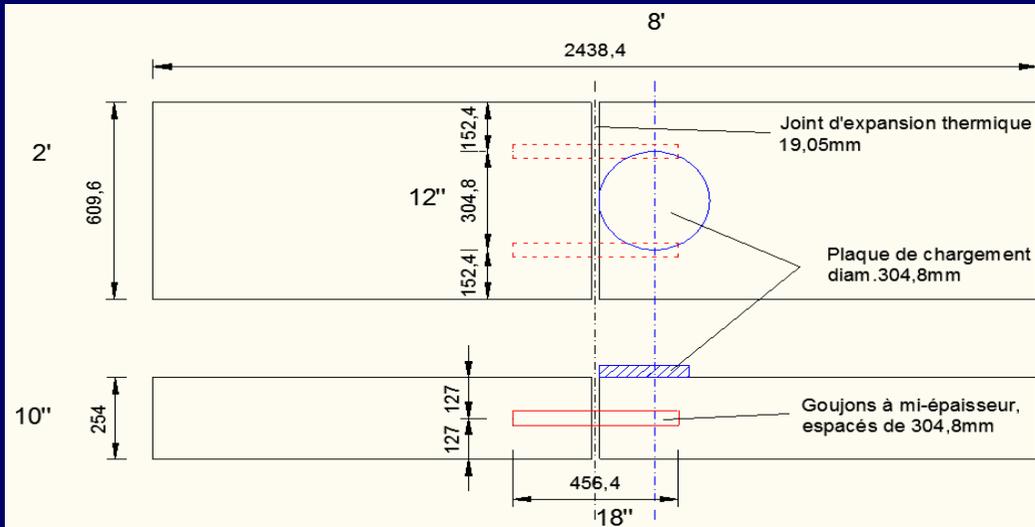
$$f_b = \frac{(4-b)f'_c}{3} \quad \sigma_b = Ky_0$$

➤ Usuellement goujons d'acier de 28,6 ou 31,8 mm - $l = 18$ po, avec $e = 12$ po

$$\Delta = 2y_0 + z \left(\frac{dy_0}{dx} \right) + \delta + \frac{Pz^3}{12EI}$$

Phase III : Analyse structurale

Design



- Dimension représentative d'un pneumatique de ½ essieu, $S = 0,073 \text{ m}^2$ (FWD test)
- Béton de chaussée type IIIA, $G_u \text{ BSf}, 45 \text{ Mpa}$
- 1 essieu simple de 80 kN, tandem de 155 kN, tridem de 210 kN
- Test sous 40 kN, exigence $E > 75\%$ et $LTE > 60\%$
- *Design des goujons:*

- Référence ACIER 28,6 mm

- | | | |
|----------------|--------------------------------|----------------------|
| • PRFV 34,9 mm | $\sigma_{prf}/\sigma_a = 0,92$ | $Y_{prf}/Y_a = 1,92$ |
| • PRFV 38,1 mm | $\sigma_{prf}/\sigma_a = 0,78$ | $Y_{prf}/Y_a = 1,62$ |

Phase III : Analyse structurale

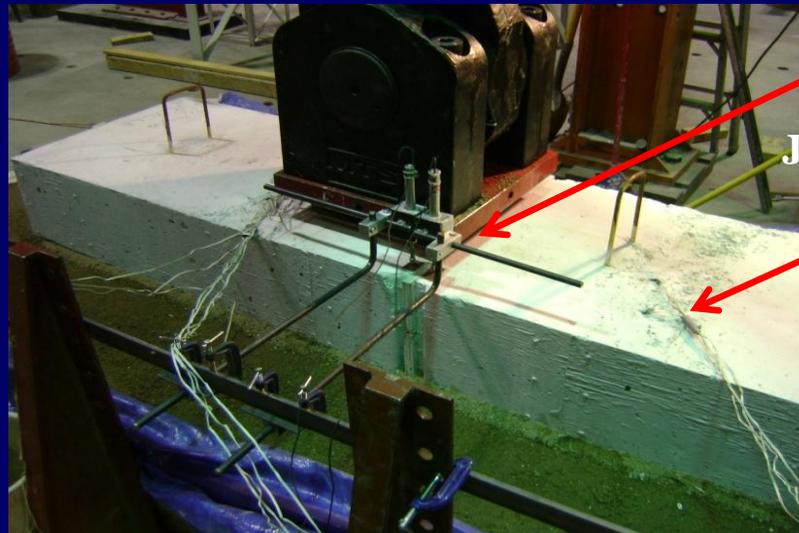
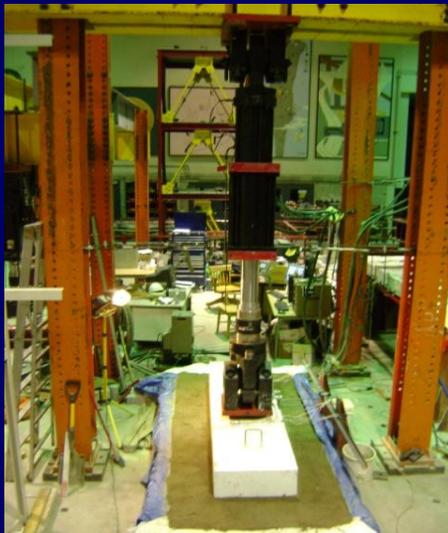
Montage

Base granulaire 300 mm
Spécification MTQ
 $K = 110 \text{ MPa/m}$



BCD Roctest

Montage général



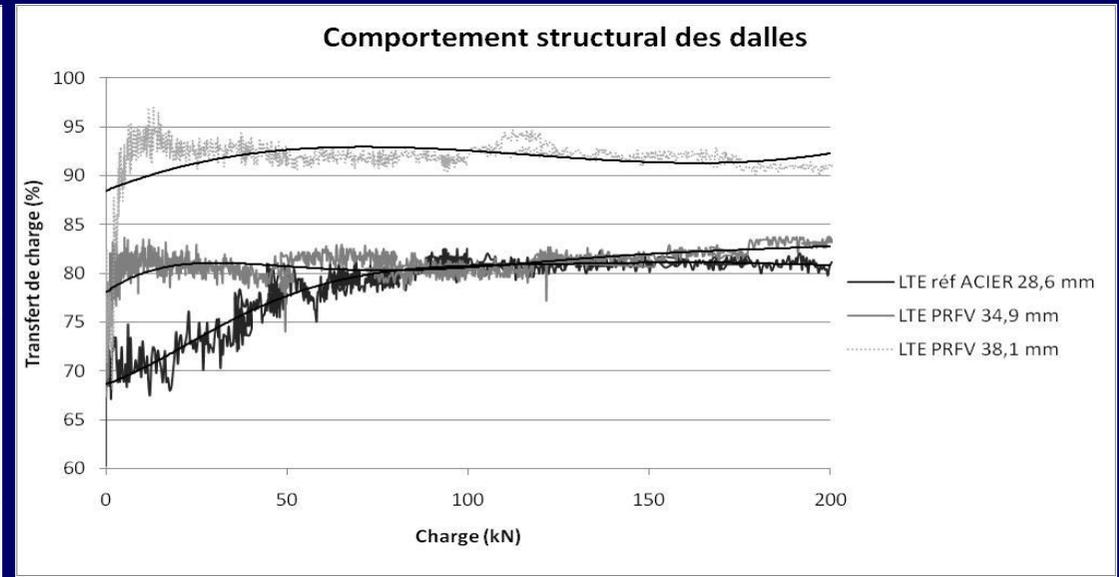
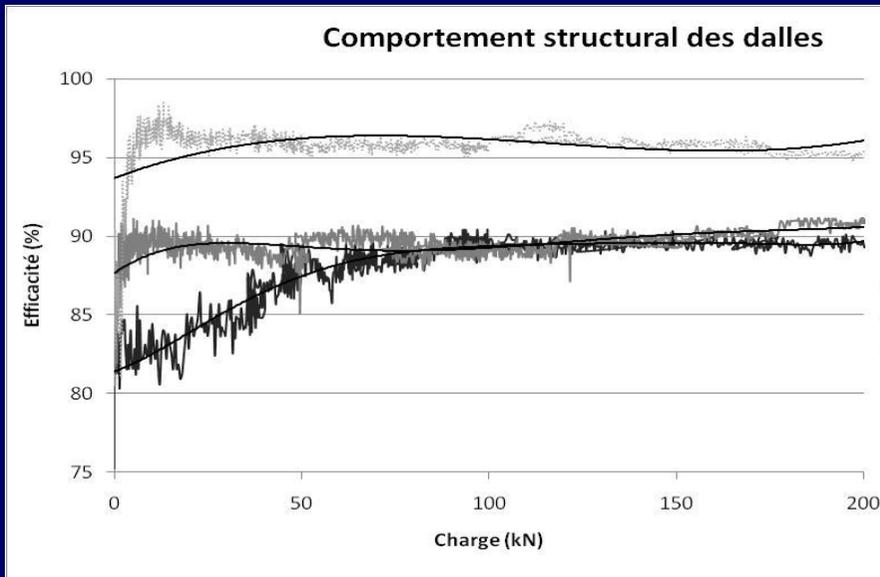
LVDT (y , E , LTE)

Jauges de déformation

Phase III : Analyse structurale

Résultats *Essais statiques*

- 1^{er} chargement à 200 kN (0,01 mm/s) ;
- Rechargement à la rupture après fissuration.



- *Performance structurale constante bien au delà des conditions de service*
- *Critères $E > 75\%$ et $LTE > 60\%$ amplement satisfaits*
- *Spécimens doivent demeurer non fissurés ($\nabla 15-20\% > 100$ kN)*

Phase III : Analyse structurale

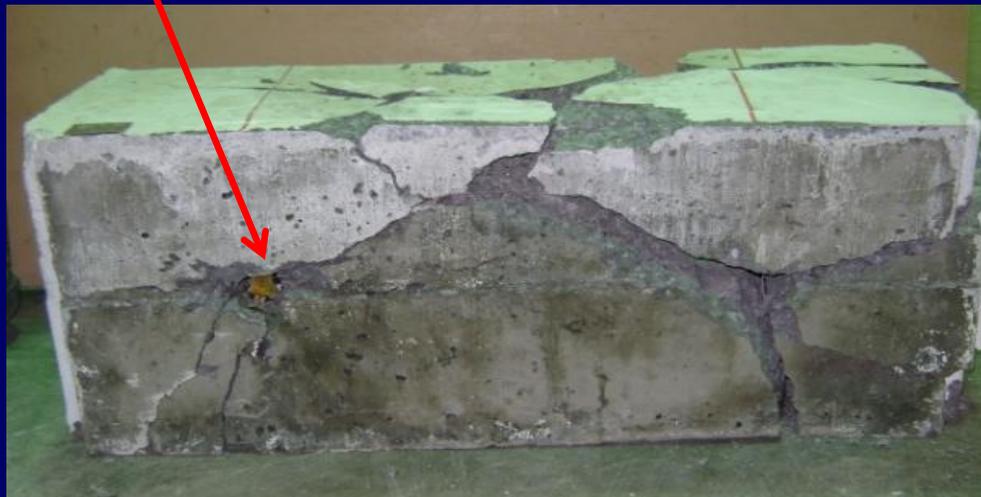
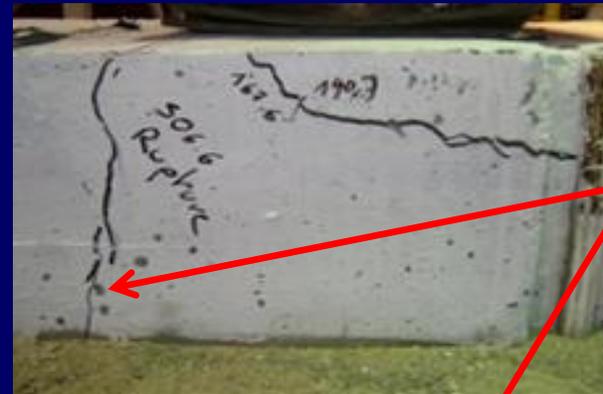
Résultats *Essais monotoniques*

Fissuration dalle acier coté chargé

Fissures radiales



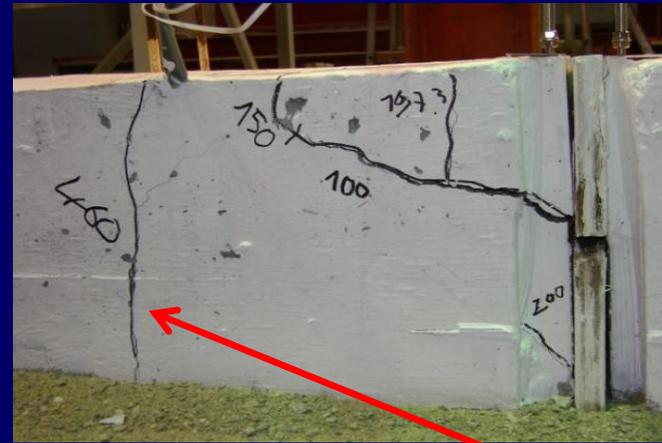
Rupture par cisaillement du béton



Phase III : Analyse structurale

Résultats *Essais monotoniques*

Fissuration dalle PRFV 34,9 mm coté chargé



Fissures radiales

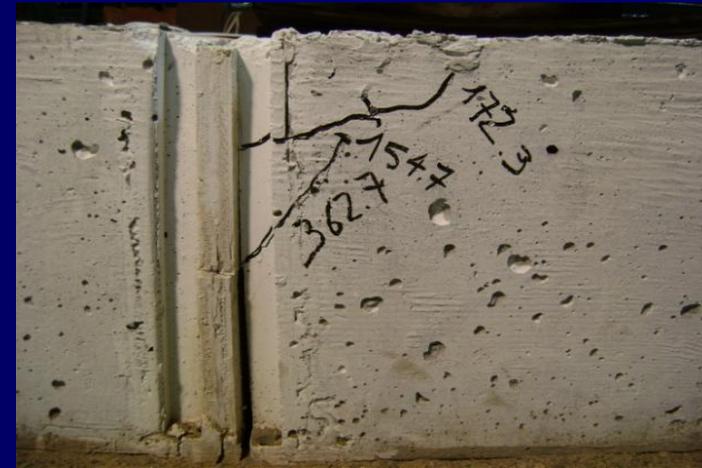
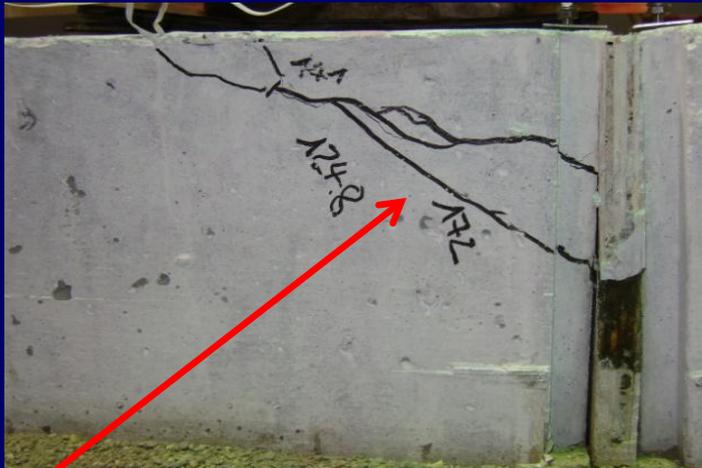
Rupture par cisaillement du béton



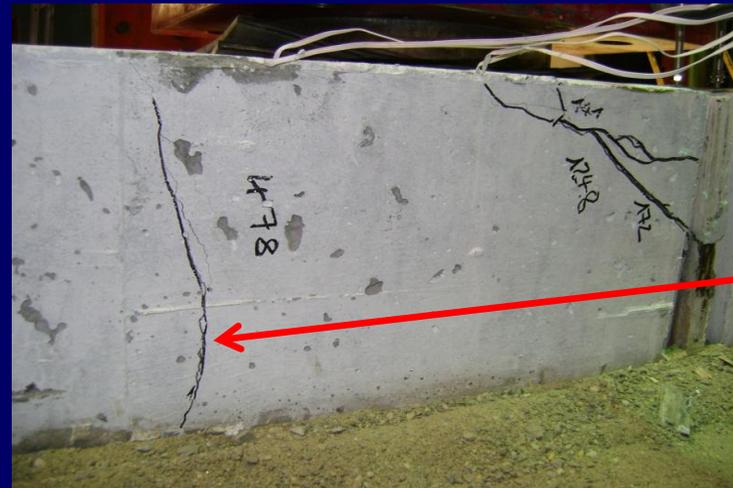
Phase III : Analyse structurale

Résultats *Essais monotoniques*

Fissuration dalle PRFV 38,1 mm coté chargé



Fissures radiales

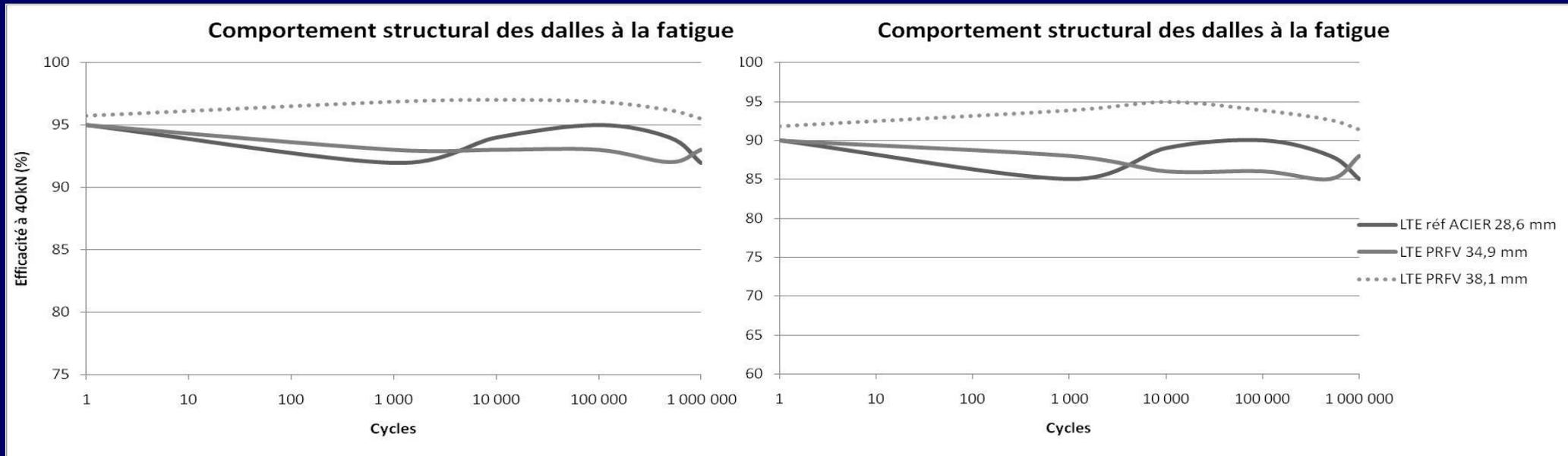


Rupture par cisaillement du béton

Phase III : Analyse structurale

Résultats *Essais de fatigue*

- Chargement de 10 à 50 kN à 15 Hz;
- E et LTE sous chargement monotonique à 40 kN => 1 000 000 cycles :



- *Performance structurale des essais initiaux confirmée*
- *Critères E > 75% et LTE > 60% amplement satisfaits, pas d'effet de fatigue*
- *Aucun dommage constaté sur les goujons – aucune fissuration des dalles*

Conclusions

- L'utilisation de goujons en polymère renforcé de fibre de verre (PRFV) avec une matrice de vinylester est recommandée au MTQ
 - fibre de verre de type E (E-Glass) ou de type ECR (ECR-Glass)
 - résine vinylester
- La conformité aux spécificités suivantes doit être assurée:
 - taux de fibres massique $\geq 75\%$
 - taux d'absorption d'eau $\leq 0,15\%$
 - température de transition vitreuse $\geq 110\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - taux de polymérisation $\geq 98\%$
 - résistance au cisaillement inter-laminaire $\geq 59\text{ MPa}$
 - la résistance au cisaillement direct $\geq 170\text{ Mpa}$

Conclusions

- Méthode de design basée sur la limitation des contraintes validée
- **PRFV 34,9 mm** présente des performances égales à **ACIER 28,6 mm**
E = 92%, LTE = 86% à long terme

Alternatives pour autres grosseurs de goujons de PRFV

- **PRFV 34,9 mm** remplaçant **ACIER 28,6 mm**
- **PRFV 38,1 mm** remplaçant **ACIER 31,8 mm**
- **PRFV 41,3 mm** remplaçant **ACIER 34,9 mm**



Remerciements

Ministère des Transports du Québec (Service des chaussées)

Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG)

Fonds de recherche sur la nature et les technologies du Québec (FQRNT)

Pultrall Inc (Thetford Mines)

Université de Sherbrooke





MERCI POUR VOTRE ATTENTION

