



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

UNIVERSITE DE SHERBROOKE
Faculté de Génie
Département de Génie Civil

**CARACTERISATION DE GOUJONS DE POLYMERES
RENFORCES DE FIBRES DE VERRE (PRFV) POUR LES
DALLES DE CHAUSSEE JOINTEES**

Mémoire de Maîtrise
Spécialité : Génie Civil

Mathieu MONTAIGU

Jury : Brahim BENMOKRANE (directeur)
Amar YAHIA
Hubert CABANA

Sherbrooke (Québec), Canada

Décembre 2010

IV-2156



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-83729-0

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-83729-0

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

Résumé :

Les joints de chaussées sont mis en œuvre pour contrôler la fissuration due aux conditions thermiques et environnementales.

Par ailleurs, les goujons d'acier sont couramment utilisés au Québec dans la réalisation de dalles de chaussées en béton jointées, appelées communément dalles courtes goujonnées.

Ils permettent le transfert des charges dues au trafic entre les dalles au niveau des joints.

Il s'avère aujourd'hui que les conditions environnementales rencontrées en Amérique du Nord (et plus particulièrement au Québec) et l'emploi de sels de déglacage en hiver, favorisent les phénomènes de corrosion et de dégradation au niveau des joints qui sont un élément structural prépondérant vis-à-vis de la durabilité de ces structures de chaussées.

Des goujons de polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) peuvent être une alternative sans corrosion à ceux d'acier et/ou revêtu d'époxy actuellement mis en œuvre. Ils permettent une conception de durabilité accrue et à coûts moindres (durée de service allongée, entretiens réduits).

Ce projet propose une série d'essais en laboratoire, pour d'une part caractériser les propriétés et le comportement à court et long terme de goujons de PRFV, et d'autre part réaliser des expérimentations structurales sur des spécimens de dalles de chaussées jointées.

Un des objectifs est proposer une méthodologie de design en vue de leur utilisation dans de futurs projets.

Les goujons de PRFV qui font l'objet de ces essais sont fabriqués par la compagnie Pultrall Inc. de Thetford Mines (Québec, Canada). Deux types de goujons de PRFV sont étudiés dans le cadre de ce projet de recherche (résine polyester et vinylester) ; couvrant une gamme de sept diamètres allant de 25,4 mm à 44,5 mm.

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

Abstract:

Joints are used in concrete pavements to control cracking due to thermal and environmental conditions.

Steel dowels are commonly used in Quebec to transfer load in concrete pavements from one slab to an adjacent slab providing vertical and horizontal alignment.

In the north of America (particularly in Québec), concrete pavements are however displayed on very harsh environmental conditions favouring the corrosion of the steel dowels and the deterioration of the slab joints. Corrosion of steel dowels is aggravated by the application of de-icing salts causing severe deteriorations of concrete due to the expansion of steel during the corrosion process.

Corrosion of steel dowels in concrete pavement reduces their useful service life and creates considerable maintenance and repair expenditures and also consequences to traffic and users. In attempt to reduce the effect of de-icing salts on dowels, epoxy coated steel dowels are used. Small defects during handling inevitably occur in the epoxy coat and corrosion remains a problem. Stainless steel dowels are a corrosion-free solution but remain expansive. Therefore a better solution must be found.

Glass fibre-reinforced polymer (GFRP) dowel bars are a possible maintenance-free and non corrosive alternative that will potentially reduce the overall life cycle cost and extending the service life of the concrete pavements.

The project proposes laboratory tests in order to determine the short- and long-term behaviour and properties of GFRP dowel bars and to develop a design methodology for their use in concrete pavements.

The GFRP dowels are manufactured by the company Pultrall Inc. in Thetford Mines (Québec, Canada). Two types of resins will be used: vinylester and polyester for diameters sizes from 1 in to 1 ¼ in.

Keywords: concrete pavement, dowelled slab, jointed concrete pavement, GFRP dowel, durability, steel corrosion.

Remerciements

Je tiens à remercier le Dr Brahim Benmokrane pour m'avoir permis de réaliser ce projet de recherche, son soutien en tant que directeur de recherche, autant sur le plan académique que sur celui des activités de recherche.

Je tiens aussi à sincèrement remercier les Dr Mathieu Robert, Dr Patrice Cousin et Dr Ehab Ahmed pour leur importante aide concernant la définition, la réalisation et l'interprétation des essais expérimentaux.

De plus, l'aide des techniciens en laboratoire Simon Kelley et François Ntacorigira a été grandement appréciée pour les différents usinages nécessaires et dans la réalisation des essais structuraux.

Le soutien de l'industrie Pultrall a été très important en fournissant les produits caractérisés et demeurant à ma disposition pour toute information complémentaire.

La réalisation d'un projet de recherche ne serait pas possible sans un certain financement, je tiens donc à remercier le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), le Ministère des transports du Québec (MTQ), et l'Université de Sherbrooke.

Table des matières

Chapitre 1. Introduction	13
1.1. Mise en contexte et problématique	13
1.2. Définition du projet de recherche	14
1.3. Objectifs du projet de recherche	15
1.4. Contributions originales	16
1.5. Organigramme du programme expérimental	17
Chapitre 2. Etat de l'art	19
2.1. Généralités sur les chaussées rigides	19
2.2. Fonctionnement structural des dalles jointées	22
2.2.1. Les joints longitudinaux	23
2.2.2. Les joints transversaux	23
2.2.2.1. Joints de retrait	23
2.2.2.2. Joints d'expansion	24
2.2.2.3. Joints de construction	24
2.2.3. Paramètres de conception	26
2.3. État de l'art sur les goujons de PRFV	30
2.3.1. Généralités	30
2.3.2. Comportement structural des goujons	32
2.3.3. Durabilité	35
2.3.4. Méthodes de prédictions	39
2.3.5. Limites	41
Chapitre 3. Programme expérimental	43
3.1. Phase I : Caractérisation mécanique et physique des goujons de PRFV	43
3.1.1. Caractérisation mécanique	44
3.1.1.1. Essai de Cisaillement Direct	44

3.1.1.2.	Essai de Flexion par 4 points _____	46
3.1.1.3.	Essai de Cisaillement Interlaminaire (Short Beam Test) _____	48
3.1.2.	Propriétés physiques _____	51
3.2.	Résultats et analyse Phase I _____	56
3.2.1.	Caractérisation mécanique _____	56
3.2.1.1.	Essai de Cisaillement Direct _____	56
3.2.1.2.	Essai de Flexion par 4 points _____	59
3.2.1.3.	Essai de Cisaillement Interlaminaire (Short Beam Test) _____	62
3.2.2.	Propriétés physiques _____	66
3.3.	Phase II : Études de durabilité sur les goujons de PRFV _____	68
3.3.1.	Essais de gel/dégel _____	69
3.3.2.	Résistance chimique _____	72
3.3.3.	Essais de vieillissement accéléré _____	74
3.4.	Résultats et analyse Phase II _____	78
3.4.1.	Essais de gel/dégel _____	78
3.4.1.1.	Résultats mécaniques et physiques _____	78
3.4.1.2.	Analyse optique _____	80
3.4.2.	Résistance chimique _____	81
3.4.2.1.	Résultats mécaniques et physiques _____	81
3.4.2.2.	Analyse microstructurale _____	86
3.4.3.	Essais de vieillissement accéléré _____	90
3.4.3.1.	Résultats mécaniques et physiques _____	90
3.4.3.2.	Analyse microstructurale _____	96
3.4.3.3.	Prédictions à long terme _____	98
3.5.	Phase III : Étude structurale et expérimentation _____	104
3.5.1.	Objectif _____	104
3.5.2.	Conception _____	104
3.5.2.1.	Exemple de conception _____	110
3.5.2.2.	Récapitulatif de la procédure _____	115
3.5.3.	Expérimentation _____	117
3.5.3.1.	Spécimens de dalles jointées _____	117

3.5.3.2.	Base granulaire	123
3.5.3.3.	Essais statiques	125
3.5.3.4.	Essais cycliques	126
3.6.	Résultats et analyse Phase III	127
3.6.1.	Essais statiques	127
3.6.2.	Essais cycliques	140
Chapitre 4.	Conclusions	146

Liste des tableaux

2.1 : Standards de dimensionnement des goujons selon l'épaisseur du pavage [MTQ, 2009]	25
2.2 : Propriétés des différentes résines [ISIS Design Manual #3, 2009]	31
3.1 : Essais de caractérisation mécanique	44
3.2 : Dimensions des échantillons et de l'essai	49
3.3 : Résistance au cisaillement direct à température ambiante	56
3.4 : Essai de flexion par 4 points à température ambiante	59
3.5 : Résistance au cisaillement interlaminaire à température ambiante	63
3.6 : Propriétés physiques des goujons de PRFV	66
3.7 : Nombres de points par capillarité observés	67
3.8 : Valeurs du paramètre t	77
3.9 : Résultats du t test pour les goujons VE 25,4 mm au cisaillement direct	80
3.10 : Résultats du t test pour les goujons PE 25,4 mm au cisaillement direct	80
3.11 : Résultats du t test pour les goujons VE 25,4 mm au cisaillement interlaminaire	83
3.12 : Résultats du t test pour les goujons PE 25,4 mm au cisaillement interlaminaire	83
3.13 : Evolution de la T_g après conditionnement en solutions chimiques	83
3.14 : Evolution du module d'élasticité en solutions chimiques	86
3.15 : Variation de la T_g après vieillissement de 180 jours à 60°C	95
3.16 : Jours pour atteindre un taux de rétention en flexion (goujons PE)	100
3.17 : Valeurs du module K obtenues expérimentalement (pci) [Porter et al., 2006]	107
3.18 : Paramètres de conception	111
3.19 : Procédure de conception	116
3.20 : Variation des paramètres à échelle réduite	119
3.21 : Paramètres de conception	120
3.22 : Résultats théoriques des alternatives	121
3.23 : Modules de réaction du sol support dans la littérature	123
3.24 : Efficacité structurale sous charge de service (40 kN)	135
3.25 : Fissuration des spécimens	135
3.26 : Efficacité structurale sous charge de service (40 kN)	144
3.27 : Fissuration des spécimens	144

Liste des figures

1.1 : Organigramme du projet de recherche	18
2.1 : Répartition de la charge sur des chaussées a) en asphalte, b) en béton [Ciment Québec, 2002]	19
2.2 : Conséquences du verrouillage d'un joint [Park et al., 2008]	21
2.3 : Types et disposition des joints	22
2.4 : Effet du mauvais alignement des goujons [ACPA, 2008]	25
2.5 : Goujons sur paniers avant bétonnage [Turgeon et al., 2009]	26
2.6 : Illustration du transfert de charge [Smith, 2001]	27
2.7 : Efficacité du joint [Eddie et al., 2001]	27
2.8 : Modes de fonctionnement en service des goujons [Won et al., 2006]	28
2.9 : Distribution de la charge [Davis, 1998]	29
2.10 : Courbes contrainte/déformation des PRF, fibres et matrice [ISIS Design Manual #3, 2009]	30
2.11 : Procédé de pultrusion [Pultrall, 2009]	31
2.12 : Transferts de charge des différents goujons à différentes périodes [Smith, 2001]	32
2.13 : Montage de l'AASHTO a) théorique, b) expérimental [Porter, 2003]	33
2.14 : Efficacité du joint sous chargement statique a) initial, b) jusqu'à 1 000 000 de cycles	34
2.15 : Infiltration des ions agressifs par le joint de chaussée ou une fissure [Park et al., 2008]	35
2.16 : Hydrolyse de la matrice par les ions OH ⁻ [Park et al., 2008]	36
2.17 : Propriétés interlaminaires résiduelles (%) [Park et al., 2008]	37
2.18 : Résistance au cisaillement à 70°C a) en solution aqueuse et b) en solution alcaline	37
2.19 : Résistance au cisaillement en solution saline à 70°C [Won et al., 2006]	38
2.20 : Résistance au cisaillement interlaminaire après des cycles de gel/dégel [Won et al., 2006]	38
2.21 : Évolution du degré de réaction k en fonction de la température [Robert et al., 2008]	39
2.22 : Simulation jours de service à 10,4°C/jours d'essai en fonction de la température	41
2.23 Absorption d'eau de barres de PRFV dans l'eau à différentes températures [Wang, 2005]	42
3.1 : Goujons d'acier, de PRFV polyester et vinylester	43
3.2 : Montage de cisaillement direct	45
3.3 : Montage de flexion par 4 points	46
3.4 : Poulie de support et chargement	47
3.5 : Montage de cisaillement interlaminaire [ASTM D 4475-02]	49
3.6 : Phase de transition vitreuse	53
3.7 : Analyseur DSC Q10	54
3.8 : Analyseur TMA Q400	55
3.9 : Rupture en cisaillement de goujons de PRFV vinylester	57
3.10 : Rupture en cisaillement de goujons de PRFV polyester	57
3.11 : Résistance au cisaillement direct à différentes températures (résine vinylester)	58
3.12 : Résistance au cisaillement direct à différentes températures (résine polyester)	58
3.13 : Rupture en flexion par compression des goujons de PRFV (plus gros diamètres)	60
3.14 : Rupture en flexion par tension des goujons de PRFV (plus petits diamètres)	60
3.15 : Rupture en flexion équilibrée des goujons de PRFV (tension et compression)	61
3.16 : Résistance à la flexion par 4 points à différentes températures (résine vinylester)	61
3.17 : Résistance à la flexion par 4 points à différentes températures (résine polyester)	62
3.18 : Résistance au cisaillement interlaminaire à température ambiante (résine vinylester)	63
3.19 : Résistance au cisaillement interlaminaire à température ambiante (résine vinylester)	64
3.20 : Rupture en cisaillement interlaminaire de goujons de PRFV vinylester	65
3.21 : Rupture en cisaillement interlaminaire de goujons de PRFV polyester	65
3.22 : Essai de pénétration à la fuchsine	68
3.23 : Spécimen de goujon enrobé de béton pour essai de gel/dégel	69
3.24 : Spécimens non conditionnés de 25,4 mm de diamètre	70
3.25 : Spécimens à saturation dans l'eau de 25,4 mm de diamètre	70
3.26 : Spécimens enrobés de béton à saturation dans l'eau	71
3.27 : Goujons de PRFV conditionnés en solution chimique	72
3.28 : Containers de vieillissement accéléré en chambre environnementale	75
3.29 : Résistance au cisaillement direct de goujons 25,4 mm après 300 cycles de gel/dégel	78
3.30 : Résistance au cisaillement interlaminaire de goujons 25,4 mm après 300 cycles de gel/dégel	79

3.31 : microscopies optiques après 300 cycles de gel/dégel de goujons a) de polyester et b) de vinylester	81
3.32 : Résistance au cisaillement interlaminaire après 90 jours de conditionnement dans différentes solutions (résine vinylester)	81
3.33 : Résistance au cisaillement interlaminaire après 90 jours de conditionnement dans différentes solutions (résine polyester)	82
3.34 : Aspect des goujons en polyester conditionnés 90 jours en solution de NaOH à 3%	83
3.35 : Taux d'absorption d'eau à saturation des barres en résine vinylester	84
3.36 : Taux d'absorption d'eau à saturation des barres en résine polyester	85
3.37 : Cinétique d'absorption résine polyester	85
3.38 : Microscopies à l'état initial de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 500 et b) 2 000 fois	86
3.39 : Microscopies après 90 jours en solution de 3% NaOH de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 1 000 et b) 3 000 fois	87
3.40 : Microscopies à l'état initial de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 500 et b) 5 000 fois	87
3.41 : Microscopies après 90 jours en solution de 3% NaOH de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 250 et b) 2 500 fois	88
3.42 : Microscopies après 90 jours en solution de 3% NaOH de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm (grossissements de 500 fois au centre de la barre)	88
3.43 : Microscopies de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm (grossissements de 200 fois en surface de la barre)	89
3.44 : Microscopies de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm (grossissements de 200 fois en surface de la barre)	89
3.45 : Résistance au cisaillement direct après conditionnement (résine vinylester)	90
3.46 : Résistance au cisaillement direct après conditionnement (résine vinylester)	91
3.47 : Résistance au cisaillement direct après conditionnement (résine polyester)	91
3.48 : Résistance au cisaillement direct après conditionnement (résine polyester)	92
3.49 : Résistance à la flexion par 4 points après conditionnement (résine vinylester)	92
3.50 : Résistance à la flexion par 4 points après conditionnement (résine vinylester)	93
3.51 : Résistance à la flexion par 4 points après conditionnement (résine polyester)	93
3.52 : Résistance à la flexion par 4 points après conditionnement (résine polyester)	94
3.53 : Aspect des goujons de polyester à l'état de saturation	95
3.54 : Microscopies à l'état initial de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 500 et b) 5 000 fois	96
3.55 : Microscopies après 180 jours d'immersion à 60°C de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 3 000 et b) 10 000 fois	96
3.56 : microscopies à l'état initial de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 500 et b) 2 000 fois	97
3.57 : microscopies après 180 jours d'immersion à 60°C de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 700 et b) 3 000 fois	97
3.58 : Faciès de rupture en flexion de goujons de diamètre 25,4 mm après 180 jours à 60°C en solution alcaline (grossissement de 1 000 fois)	98
3.59 : Courbes de dégradation en fonction du temps et de la température a) échelle linéaire et b) logarithmique	99
3.60 : Courbes des taux de rétention de la contrainte en flexion en fonction de la température	100
3.61 : Prédiction des propriétés mécaniques à long terme	101
3.62 : Facteurs de changement de temps (FCT) pour chaque type de résine	103
3.63 : Poutre semi-infinie sur une base élastique [Porter, 2006]	105
3.64 : Courbe de déflexion d'un goujon au sein du béton [Murison et al., 2002]	105
3.65 : Instrumentation de spécimens de dalles goujonnées [Porter et al., 2006]	107
3.66 : Déflexion relative entre dalles goujonnées [Porter et al., 2006]	109
3.67 : Distribution de la charge [Davis, 1998]	112
3.68 : Distribution du transfert de charge	112
3.69 : Dimensions des spécimens de dalle étudiés (mm)	118
3.70 : Disposition et instrumentation des goujons au niveau du joint a) pour essai statique et b) pour essai cyclique	122

3.71 : Coffrage des dalles jointées	122
3.72 : Surfaçage et mûrissement humide des dalles jointées	122
3.73 : Container de la base granulaire	124
3.74 : appareil BCD de contrôle de compaction	124
3.75 : Montage en laboratoire	125
3.76 : Mesure des déflexions de chaque dalle de part et d'autre de joint (LVDT)	126
3.77 : Fissuration de la dalle côté chargé a) bord 1, b) bord 2 et c) rupture en cisaillement	128
3.78 : Efficacité et transfert de charge sous chargement monotonique de la dalle ACIER de référence	128
3.79 : Déflexion relative des dalles ACIER sous chargement monotonique	129
3.80 : Fissuration de la dalle côté chargé a) bord 1, b) bord 2 et c) rupture en cisaillement	130
3.81 : Efficacité et transfert de charge sous chargement monotonique de la dalle PRFV 34,9 mm	131
3.82 : Déflexion relative des dalles sous chargement monotonique (PRFV 34,9 mm)	132
3.83 : Fissuration de la dalle côté chargé a) bord 1, b) bord 2 et c) rupture en cisaillement	133
3.84 : Efficacité et transfert de charge sous chargement monotonique de la dalle PRFV 38,1 mm	134
3.85 : Déflexion relative des dalles sous chargement monotonique (PRFV 38,1 mm)	135
3.86 : Efficacité du joint sous chargement monotonique des différentes dalles	136
3.87 : Transfert de charge sous chargement monotonique des différentes dalles	137
3.88 : Déflexion relative des différentes dalles sous chargement monotonique	138
3.89 : Déflexion totale des dalles sous chargement monotonique (dalle côté chargé)	139
3.90 : Soulèvement des extrémités des dalles sous chargement de 400 kN	139
3.91 : Efficacité du joint à long terme des différentes dalles sous chargement réglementaire de 40 kN	140
3.92 : Transfert de charge des différentes dalles sous chargement réglementaire de 40 kN	141
3.93 : Réseau de fissuration à la rupture après 1 million de cycles (dalle acier 28,6 mm)	142
3.94 : Réseau de fissuration à la rupture après 1 million de cycles (dalle PRFV 34,9 mm)	143
3.95 : Réseau de fissuration à la rupture après 1 million de cycles (dalle PRFV 38,1 mm)	143

Liste des acronymes

PRF : Polymères Renforcés de Fibres
PRFV : Polymères Renforcés de Fibres de Verre
MTQ : Ministère des Transports du Québec
CRSNG : Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie
ACPA : *American Concrete Pavement Association*
ECAS : Equivalent de Charge Axiale Simple
AASHTO : *American Association of State Highway and Transportation Officials*
DJMA : Débit Journalier Moyen Annuel
LTE : *Load Transfer Efficiency*
FWD : *Falling Weight Deflectometer*
FCT : Facteur de Changement de Temps
CET : Coefficient d'Expansion Thermique
ACI : *American Concrete Institute*
LVDT : *Linear Variable Differential Transformer*
ISIS : *Intelligent Sensing for Innovative Structures*
DSC : *Differential Scanning Calorimetry*
TMA : *Thermo Mechanical Analysis*
DMA : *Dynalic Mechanical Analysis*
BCD : *Briaud Compaction Device*

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, omiéragage, nids de poule, fatigue, pompage des sols, comportement au dégel et érosion). 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 sévères caractérisées par des cycles de gel/dégel et des écarts de températures importantes, 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 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 de ces dégradations sont les suivantes :

- Réduction du cycle de vie de la structure par rapport à la conception initiale ;
- Coûts de maintenance élevés ;
- Impact sur le confort de roulement ;
- 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.

Pour d'autres types de structure de génie civil concernés par la corrosion, les matériaux composites de polymères renforcés de fibres (PRF) offrent déjà des solutions efficaces 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.

1.2 Définition du projet de recherche

Les barres d'armatures de PRFV sont à l'étude depuis de nombreuses années. Les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des produits disponibles sur le marché sont de mieux en mieux connues. Ces produits sont de plus en plus utilisés dans de nouveaux ouvrages et font l'objet de codes de certifications et de conception.

Depuis quelques années, les goujons de PRFV font l'objet d'études de durabilité et de comportement structural, et quelques réalisations expérimentales in-situ ont également été menées aux Etats-Unis.

Fort du développement croissant des matériaux composites pour le génie civil et de l'amélioration permanente des produits, leur emploi pourrait se justifier pour la réalisation de nouveaux projets routiers au Québec. Dans le but de proposer les goujons de PRFV comme alternative à l'acier, il est nécessaire de caractériser ces produits face aux critères des différents codes et normes relatifs à la conception, la durabilité et le comportement structural.

Il est à noter que l'enjeu majeur quant à l'acceptation et à la généralisation d'emploi de ces nouveaux produits par l'industrie du génie civil repose sur la validation de la durabilité des produits.

1.3 Objectifs du projet de recherche

L'objectif général de ce projet de recherche vise à caractériser et à évaluer la performance des goujons de PRFV pour concevoir des chaussées en béton de durabilité accrue, sécuritaires et performantes, et ainsi proposer une alternative aux goujons d'acier actuellement utilisés par le Ministère des Transports du Québec (MTQ).

La caractérisation des goujons comprend des essais mécaniques et physiques, des essais permettant d'évaluer la durabilité des produits au-delà de la durée de service, et des essais structuraux sur des dalles de béton goujonnées à échelle réduite validant la méthode de design proposée.

Les essais sont réalisés sur des goujons de PRFV manufacturés par la compagnie Pultrall Inc. de Thetford Mines (Québec, Canada). Des goujons constitués de résine vinylester et polyester sont testés.

Pour atteindre ces objectifs, trois phases de recherche ont été ainsi déterminées :

Objectifs généraux :

- Une première phase vise à caractériser le comportement mécanique des goujons de PRFV en vu du design ainsi que leurs propriétés physiques les caractérisant vis-à-vis des codes en vigueur ;
- Une deuxième phase vise à déterminer la durabilité des goujons par leur résistance en environnements simulant les conditions d'utilisation sur le terrain ;

Objectifs spécifiques :

- Dans la seconde phase du projet, un vieillissement accéléré permettra de prédire les propriétés résiduelles à long terme des matériaux sous conditions environnementales de service ;

- La troisième phase du projet est une étude structurale évaluant la performance des goujons en service et proposant une méthode de design en vue de leur utilisation comme alternative à l'acier.

1.4 Contributions originales

Le présent projet doit permettre de développer l'alternative composite pour les dalles courtes goujonnées. Réalisé au sein du département de l'université de Sherbrooke, en partenariat avec le MTQ, la chaire de recherche du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) sur les matériaux composites novateurs de PRF pour les infrastructures et l'industrie Pultrall, ce projet propose une étude complète sur une gamme de nouveau produit (caractérisation, comportement structural, durabilité).

Des études menées séparément ont permis de développer l'usage de goujons de PRFV au Etats-Unis et dans certaines autres provinces Canadiennes (Manitoba, Ontario) ; ainsi le MTQ disposera de certifications et recommandations adaptées aux codes et spécifications en vigueur au Québec. La production au Québec de ces produits assure également leur disponibilité et leur compétitivité ainsi qu'un meilleur retour d'expérience.

D'autre part, ce projet propose de nouvelles approches, notamment vis-à-vis des essais de durabilité, proposant les dernières méthodes plus représentatives des conditions réelles (essai de gel/dégel adapté, méthode de vieillissement accéléré). En effet, le développement des études de durabilité sur les barres composites ces dernières années permet de relativiser les premiers travaux effectués qui avaient tendance à sur-dégrader les échantillons testés, et d'affiner ces méthodes de vieillissement utilisant pour ce projet des solutions alcalines plus représentatives des conditions réelles (solution simulant l'eau des pores capillaires du béton, solution de ciment). Il est important de noter que les études sur la durabilité des goujons de PRFV sont assez peu nombreuses et c'est un enjeu primordial que de caractériser le comportement dans le temps de ces produits vis-à-vis des décideurs public et de l'industrie du génie civil.

Un autre objectif est d'évaluer les performances de goujons en résine polyester. Ce type de résine est encore écarté des codes mais les dernières améliorations des produits sont encourageantes. Les essais de durabilité permettront de clairement évaluer ses performances face à la résine vinylester en vue leur utilisation éventuelle puisqu'elle présente un coût moindre.

Enfin l'intérêt de la recherche scientifique dans ce domaine précis des goujons de PRFV est justifié, ces produits offrant des performances de durabilité bien supérieures à l'acier et un comportement structural très satisfaisant. Investiguer plus avant ces matériaux permettra d'élargir leur champ d'application et d'optimiser leur utilisation.

1.5 Organigramme du programme expérimental

L'arborescence des différents essais du projet est exposée sur la figure suivante :

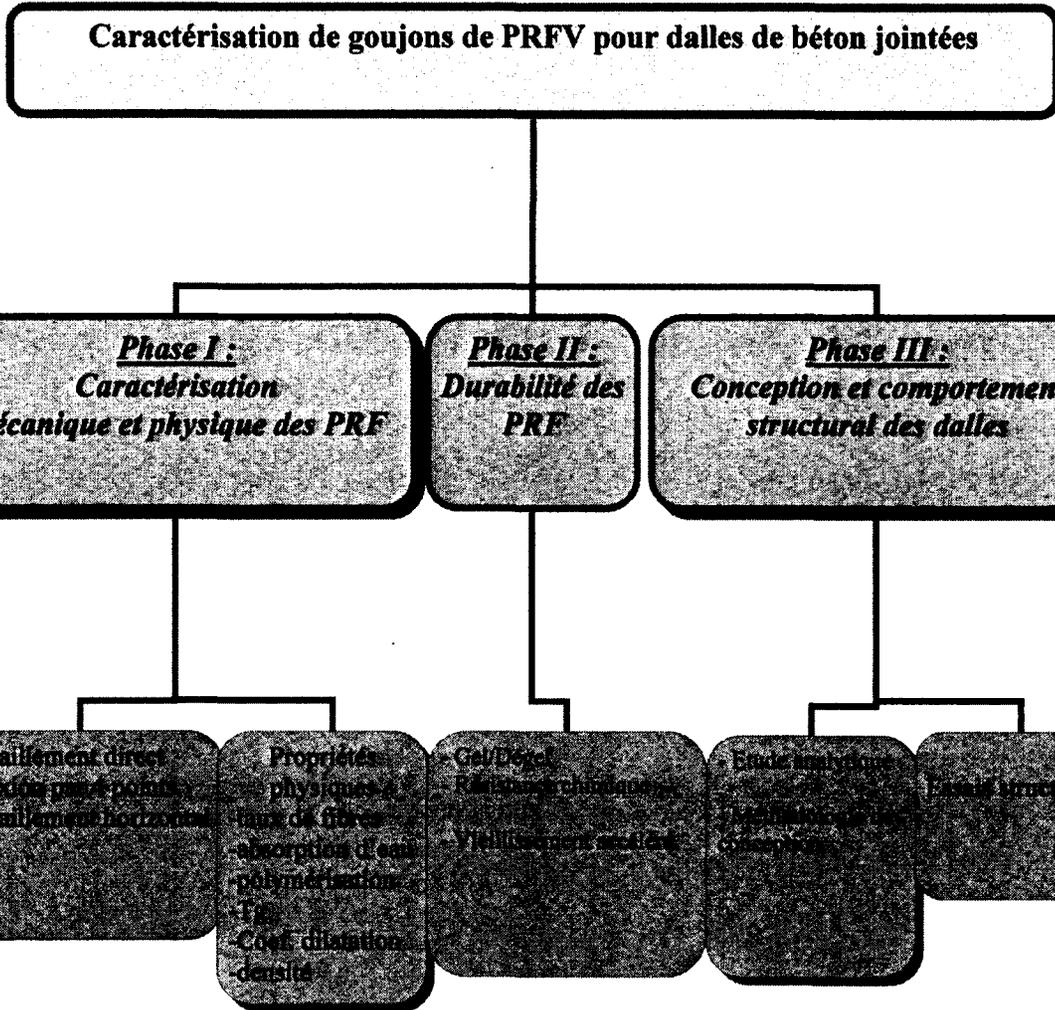
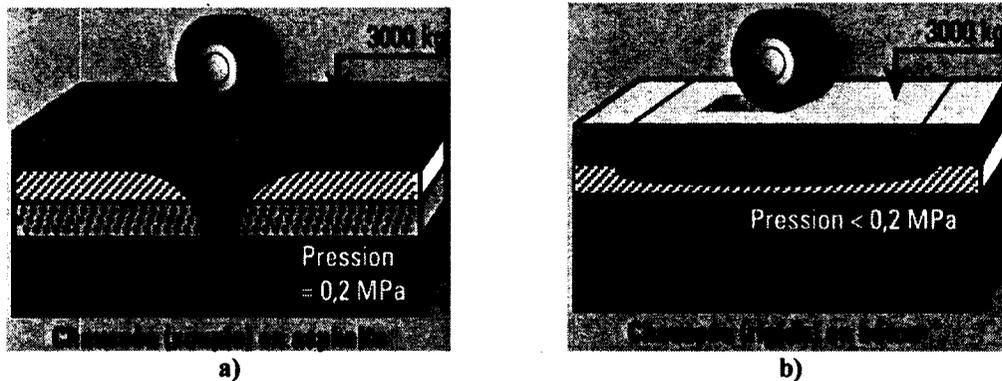


Figure 1.1 : Organigramme du projet de recherche

Chapitre 2 Etat de l'art

2.1 Généralités sur les chaussées rigides

Les chaussées urbaines sont de plus en plus âgées et de plus en plus sollicitées alors que les budgets de maintenance sont de plus en plus réduits [MTQ, 2009]. Compte tenu des prix élevés de l'asphalte, la solution de chaussées rigides en béton se justifie, particulièrement aux endroits où les sollicitations imposées le sont par une circulation lourde (camions et autobus). Les chaussées en béton adéquatement conçues et mises en œuvre offriront une longue durée de vie parce que, de par leur rigidité, elles sollicitent moins leurs fondations et sols support réduisant d'autant les contraintes, ce qui est particulièrement important en période de dégel (figures 2.1). Les chaussées rigides sont également une bonne solution à l'orniérage et à la formation de nids de poule. La période de service de conception étant d'au moins 30 ans.



Figures 2.1 : Répartition de la charge sur des chaussées a) en asphalte, b) en béton [Ciment Québec, 2002]

En Amérique du nord, il y a trois différents types de pavages rigides : les dalles courtes goujonnées ou non, les dalles armées avec joints et les dalles armées continues. Les dalles courtes de béton jointées sont les plus utilisées au Québec.

Les mélanges de béton pour les pavages sont conçus pour produire la résistance à la flexion désirée ainsi qu'une durabilité satisfaisante face aux conditions auxquelles la chaussée sera soumise tout au long de sa durée de service. Le critère de conception étant la fatigue en flexion, il est important que le module de rupture du béton soit adéquat pour résister à la fissuration de flexion due à la fatigue. Généralement, une résistance à la flexion du béton de 4,5 MPa est requise ainsi qu'une épaisseur minimale de la dalle de 200 mm [Ciment Québec, 2002].

Particulièrement au Québec, les pavages de béton doivent être conçus pour résister aux cycles de gel/dégel, l'action des sels de déglacage ainsi que l'abrasion par les chasse-neiges. Il est important que le mélange de béton ait un faible rapport eau/liants, une teneur en ciment adéquate, une teneur suffisante en air entraîné (5 à 8% sur chantier) et une cure satisfaisante [Turgeon et al., 2009].

Typiquement, le béton employé (se réfèrent à la norme 3101 du MTQ) doit présenter une résistance minimale de 35 MPa à 28 jours, avec une dimension des agrégats limitée à 20 mm et un rapport eau/liant de l'ordre de 0,42. Le béton doit avoir une texture ferme (affaissement 40 ± 20 mm), mis en place à l'aide d'un train de pavage.

Les conditions environnementales très rudes mettent à mal les structures de chaussées. L'importance des cycles de gel/dégel favorise la dégradation du béton et des joints.

Doublée à l'augmentation du trafic, les fissures et ouvertures apparaissant dans la structure du béton favorise la pénétration des eaux et des agents agressifs qu'elle transporte. Ces phénomènes accentués par l'épandage de sels de déglacage entraînent une corrosion des armatures néfaste au bon fonctionnement structural des chaussées.

La corrosion est initiée surtout par l'action des chlorures (sels), et la carbonatation du béton [Gagné, 2000].

La corrosion de l'acier entraîne les conséquences suivantes (figure 2.2) :

- Dégradation prématurée du béton, problème structural et de confort ;
- Perte de section efficace, réduction de la charge transmise ;
- Expansion due à la corrosion provoquant la fissuration du béton ;
- Expansion due à la corrosion provoquant le verrouillage du joint ;
- Soulèvements, cloquage de la dalle lorsque le joint se verrouille.

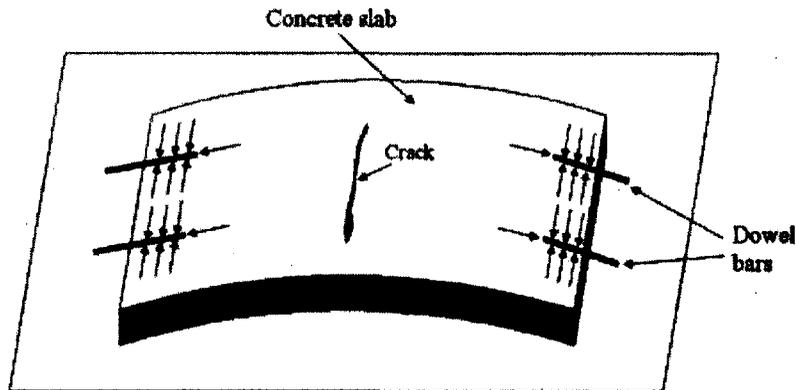


Figure 2.2 : Conséquences du verrouillage d'un joint [Park et al., 2008]

Les centres du service de la ville de Montréal rapportent que pour un tronçon à deux voies de circulation, on peut épandre jusqu'à 65 tonnes de sel par kilomètre par an [Turgeon et al., 2009]. Le MTQ et les services gouvernementaux indiquent que les coûts de réparation de toutes les structures de génie civil affectées par les problèmes de corrosion s'élèveraient à plus de 1 000 milliards de dollars [ACPA, 2009]. L'American Concrete Pavement Association (ACPA) caractérise la corrosion comme la première source de dégradations prématurées en période de service des chaussées rigides, ayant un impact économique et social lourd (coûts d'entretien, fermetures, déviations, congestions, confort).

Afin de contrer ces problèmes, des goujons revêtus d'époxy ont été employés. Le problème de l'époxy (outre le coût) est la mise en œuvre ; si des défauts de la protection époxydique sont causés pendant le stockage, la manutention, le transport ou la mise en œuvre des goujons, cette protection ne joue plus son rôle. De plus, l'incompatibilité électrochimique entre les zones protégées et les zones altérées aura pour effet d'accélérer les processus de corrosion [Gagné, 2000].

Des relevés sur structures existantes ont démontré que les goujons d'acier peuvent présenter des réductions de section significatives et une corrosion très avancée dans un délai de 7 à 15 ans. Au delà de 15 années de service, même les goujons revêtus d'époxy présente une délamination de cette protection et une forte progression de la corrosion de l'acier [DBT-2, 1998]. L'acier inoxydable demeure quant à elle une solution très onéreuse.

2.2 Fonctionnement structural des dalles jointées

Les joints de chaussée doivent être convenablement conçus et construits pour assurer la bonne performance du pavage. Ils limitent les contraintes dans le pavage pour empêcher la formation de fissures irrégulières ; on distingue différents types de joints selon leur géométrie et leur rôle comme montré sur la figure suivante :

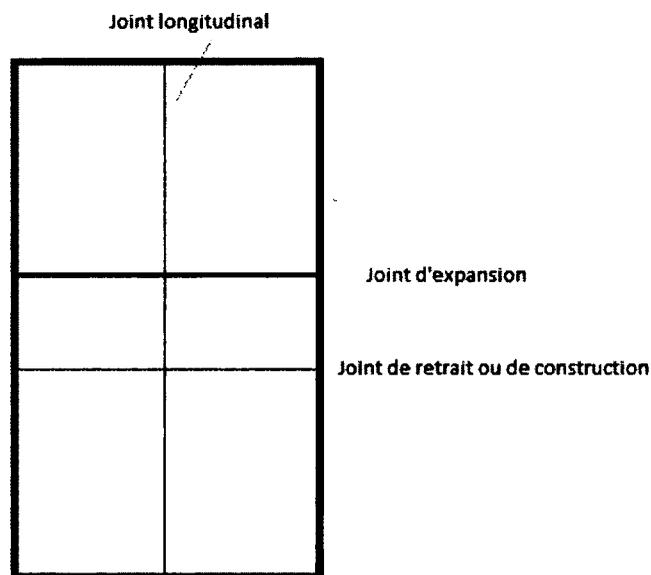


Figure 2.3 : Types et disposition des joints

2.2.1 Les joints longitudinaux

Ils sont utilisés pour contrôler la fissuration longitudinale et coïncident généralement avec le marquage des voies soit à des intervalles de 3 à 3,5 m. La profondeur de ce joint doit être de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{3}$ x l'épaisseur du pavage.

2.2.2 Les joints transversaux

Ils sont utilisés pour contrôler la fissuration transversale en permettant de relâcher les contraintes de tension lors du retrait du béton et les contraintes dues aux gradients thermiques et de teneur en humidité à l'intérieur de la dalle de béton. Leur espacement est de l'ordre de 4 à 6 m [MTQ, 2009].

2.2.2.1 Joints de retrait

Ils permettent de contrôler la fissuration du béton due au retrait du béton, ils sont généralement réalisés par sciage dans le béton durci sur une épaisseur de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{3}$ x l'épaisseur de la dalle. Le moment du sciage doit être déterminé avec soin, le béton pouvant supporter le dispositif de sciage et assez tôt pour prévenir des fissures de retrait, généralement dans les 12 heures suivant le bétonnage [IDT, 2005]. Dans ce type de joint on obtient un emboîtement granulaire (*aggregate interlock*) formé par les granulats situés sous le joint et assurant une partie de la continuité. Ce paramètre dépendant des caractéristiques des granulats (adhérence, friction) et de leur disposition dans le béton, il est difficile à évaluer et de ce fait non pris en compte dans le design. Ces joints présentent donc souvent des caractéristiques supérieures par rapport à la conception.

2.2.2.2 Joints d'expansion

Ils permettent les variations dimensionnelles des dalles dues aux gradients thermiques et de désolidariser les dalles entre elles ou vis-à-vis d'une structure connexe (puisard, borne incendie, autre structure en béton). Ces joints ont une épaisseur de l'ordre de 12 à 25 mm et peuvent aller jusqu'à 50 mm, et sont conçus en fonction des déformations thermiques prévues dans le béton selon l'équation suivante :

$$\Delta L = CL \times (\alpha \Delta T + \Sigma) \quad (2.1)$$

Avec C : coefficient de friction base/dalle (0,65 pour les bases stabilisées, 0,8 pour les bases granulaires)

L : longueur de la dalle entre joints

α : coefficient d'expansion thermique granulaire (PCC)

ΔT : gradient de température annuel

Σ : coefficient de retrait thermique du béton

Ces joints sont réalisés sur toute l'épaisseur du pavage et protégés des eaux d'infiltration par un matériau étanche. Dans ces joints, les goujons assurant le transfert de charge sont équipés d'une capsule permettant le mouvement des dalles.

2.2.2.3 Joints de construction

Ces joints assurent les mêmes fonctions que les joints de retrait. La différence tient en leur mise en œuvre, ils sont généralement réalisés entre deux phases de bétonnage par un arrêt de bétonnage transversal à la chaussée, sur toute l'épaisseur du pavage. Une surface lisse est créée à l'aide d'un coffrage pour éviter toute friction lors du fonctionnement du joint. Les dalles consécutives sont ainsi réalisées en joints conjugués.

Ainsi, les goujons placés au niveau des joints transversaux assurent la bonne performance du pavage en garantissant :

- Le transfert des charges entre dalles ;
- L'alignement horizontal et vertical des dalles ;
- Le mouvement horizontal des dalles entre elles ;
- Un bon comportement structural de la chaussée.

Usuellement, ces goujons sont des barres d'acier lisses évitant ainsi l'adhérence avec le béton et permettant le bon fonctionnement du joint. Le diamètre minimal doit être $\frac{1}{8}^{\text{ème}}$ x l'épaisseur du pavage (tableau 2.1). Il s'agit le plus généralement de goujons de 38,1 mm de diamètre ($1\frac{1}{2}$ in), 18 in de longueur (45 à 55 cm en Europe selon l'épaisseur du pavage) d'une nuance d'acier de 200 à 300 MPa [DBT-2, 1998 et NF P 98-170 annexe C].

Tableau 2.1 : Standards de dimensionnement des goujons selon l'épaisseur du pavage [MTQ, 2009]

Épaisseur de la dalle (mm)	Diamètre nominal du goujon (mm)
$h \leq 210$	25,4
$210 < h \leq 230$	28,6
$230 < h \leq 260$	31,8
$260 < h \leq 290$	34,9
$290 < h$	38,1

Un mauvais alignement des goujons sur l'axe de la chaussée crée des contraintes dans la dalle lors du retrait du béton et peut entraîner des fissures transversales à environ 300 mm du joint (figure 2.4), soit presque aux extrémités des goujons. Ils doivent donc être soigneusement mis en œuvre, les paniers de support devant être ancrés dans la base (figure 2.5) [Prabhu et al., 2009] :

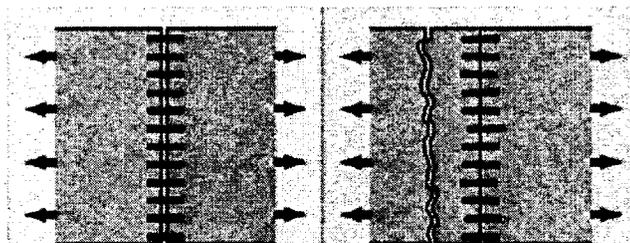


Figure 2.4 : Effet du mauvais alignement des goujons [ACPA, 2008]

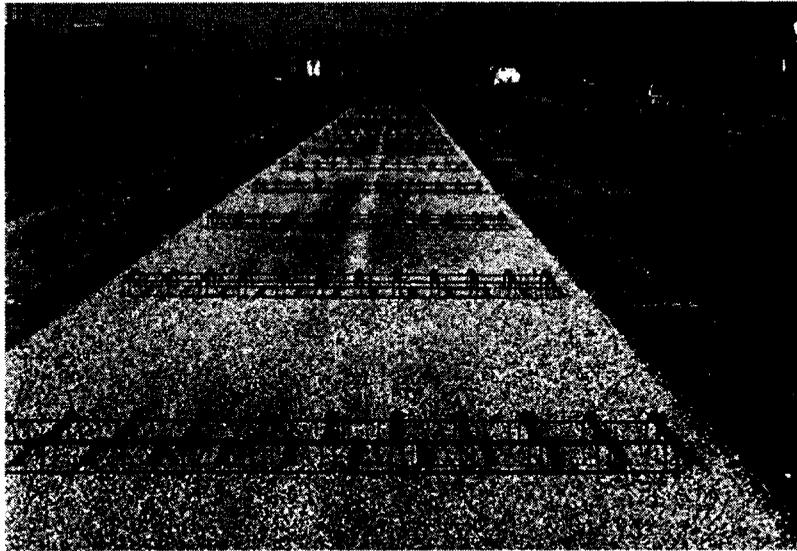


Figure 2.5 : Goujons sur paniers avant bétonnage [Turgeon et al., 2009]

2.2.3 Paramètres de conception

Les prévisions de trafic nécessaires au design sont exprimées en nombre d'Equivalent de Charge Axiale Simple (ECAS). L'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) caractérise ainsi les valeurs suivantes [AASHTO, 1993] :

- 1 ECAS = 1 essieu simple de 80 kN
- 1 essieu tandem de 155 kN
- 1 essieu tridem de 210 kN

Il est important de noter que l'agressivité du trafic n'est pas linéairement proportionnelle au chargement :

$$\text{Agressivité en ECAS} = \left[\frac{(P_{\text{essieu}})}{(P_{\text{référence}})} \right]^4 \quad (2.2)$$

Ainsi lorsque le chargement double, l'agressivité est multipliée par 16 ; un camion chargé est alors équivalent au passage de 30 000 à 40 000 voitures. Le débit journalier moyen annuel (DJMA) est un paramètre essentiel à la prévision du trafic lourd (généralement supérieur à 15 000 pour une autoroute).

L'ACPA caractérise la performance structurale des joints de chaussées par le calcul de l'efficacité du joint (*joint effectiveness*). 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 l'opposé une efficacité de 0% ne permet le déplacement que de la dalle chargée comme illustré sur les figures 2.6 et 2.7 :

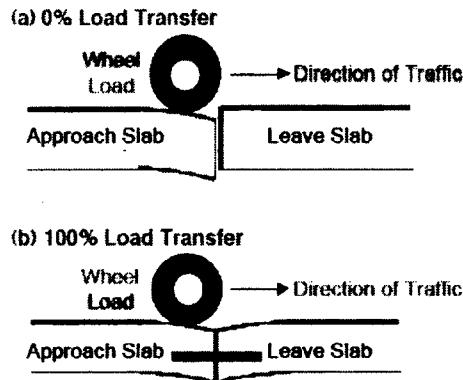


Figure 2.6 : Illustration du transfert de charge [Smith, 2001]

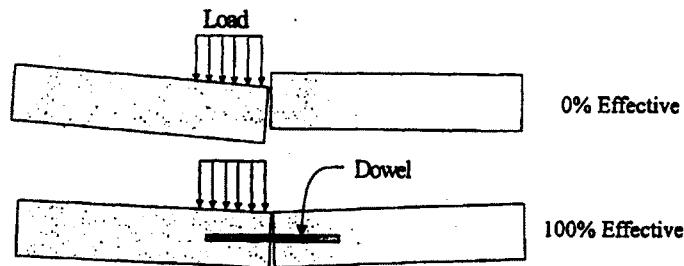


Figure 2.7 : Efficacité du joint [Eddie et al., 2001]

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

$$E = \frac{2d_u}{d_l + d_u} \times 100 \quad (2.3)$$

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 1993 qui détermine aussi un paramètre similaire qui est l'efficacité du transfert de charge (*Load Transfert Efficiency*, LTE), calculé comme suit :

$$LTE = \frac{d_u}{d_l} \times 100 \quad (2.4)$$

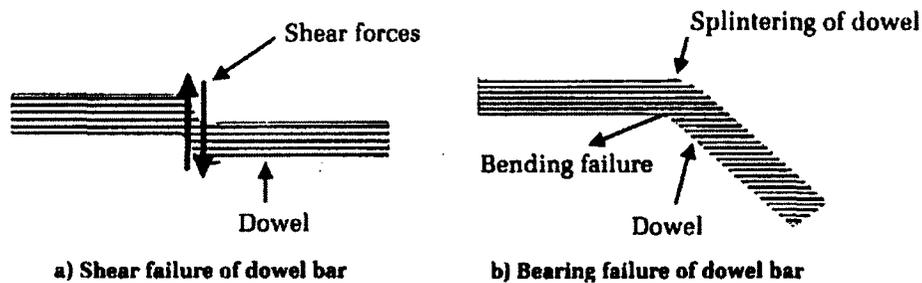
Un transfert satisfaisant est obtenu dès 60% selon les critères de l'AASHTO.

LTE et E sont reliés par l'équation suivante :

$$LTE = \left[\frac{2}{2 - E(=0,75)} - 1 \right] \times 100 \quad (2.5)$$

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

Les deux paramètres primordiaux des goujons vis-à-vis du design sont leurs propriétés au cisaillement (principal mode de fonctionnement structural) et à la flexion (de part leur longueur dans les dalles) [DBT-2, 1998], comme illustré sur les figures suivantes :



Figures 2.8 : Modes de fonctionnement en service des goujons [Won et al., 2006]

Le fonctionnement des goujons est basé sur un effet de groupe. Lors du transfert de la charge, seuls les goujons situés à une distance l_r de la charge la transmette, relativement à la rigidité de l'ensemble dalle/base (figure 2.9). Cette longueur de répartition est ainsi définie par Westergaard comme suit :

$$l_r = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad (2.6)$$

Avec E_c : module d'élasticité du béton (MPa)
 h : épaisseur de la dalle (m)
 μ : coefficient de poisson du béton
 k : module de réaction du sol support (MPa/m)



Figure 2.9 : Distribution de la charge [Davis, 1998]

Graphiquement, on détermine le nombre de goujons effectifs au transfert de charge, ce nombre est ensuite divisé par deux pour considérer le cas le plus défavorable d'un goujon en rive de dalle. La charge transférée par le goujon critique est alors égale à la charge appliquée divisée par le nombre de goujons effectifs.

On admet que lors du chargement de la dalle, 50% sont transmis directement par les goujons, le reste est diffusé dans le sol support. Une réduction supplémentaire de 5% peut être considérée due aux passages cycliques des véhicules créant un jeu autour des goujons. Ainsi la charge de design est égale à 45% de la charge appliquée [Davis, 1998].

Les différentes étapes détaillées du design sont présentées à la section 3.5.2 *Conception*.

2.3 État de l'art sur les goujons de PRFV

2.3.1 Généralités

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion). Le composite est constitué de ces deux matériaux qui ont des propriétés qui se complètent pour former un nouveau matériau aux performances globales améliorées. Les produits de Polymères Renforcés de Fibres (PRF) sont constitués d'une matrice (résine, polymère), de fibres (renforts) et d'autres constituants pour améliorer les performances du produit et sa fabrication (fillers et additifs). En effet, le nouveau matériau, ainsi constitué, possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas [Berthelot, 1992]. Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort), explique l'utilisation croissante des matériaux composites, dans différents secteurs industriels.

Les propriétés de ces produits respectent la règle des mélanges :

Propriété du PRF = Propriété fibres x Proportion fibres + Propriété résine x Proportion résine

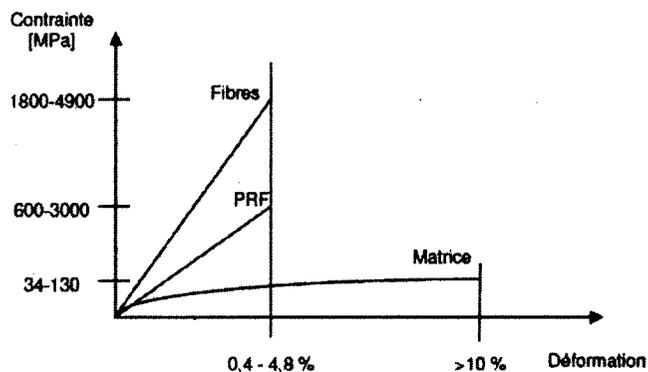


Figure 2.10 : Courbes contrainte/déformation des PRF, fibres et matrice [ISIS Design Manual #3, 2009]

Les goujons sont manufacturés par procédure de pultrusion (figure 2.11), les performances mécaniques en traction et flexion sont optimales dans la direction des fibres, moindres en flexion et cisaillement, dépendent essentiellement de la qualité des fibres, de leur dosage et de la qualité de l'interface fibres/matrice.



Figure 2.11 : Procédé de pultrusion [Pultrall, 2009]

Les principales fibres ayant fait l'objet d'études au cours des dernières années sont les fibres de verre, de carbone et d'aramide. La fibre de verre domine dans la majorité des applications. Sa vaste gamme de propriétés, son rapport résistance/coût élevé, sa disponibilité et sa facilité de mise en œuvre en font la plus importante fibre au niveau industriel.

Le rôle de la matrice est de lier et maintenir les fibres en position permettant ainsi le transfert et la redistribution des charges, procurer un confinement latéral contre le voilement des renforts en compression, mais aussi d'assurer la résistance chimique, de protéger les fibres des agressions environnementales et de l'abrasion. Sa déformation ultime doit être supérieure à celle des fibres pour pouvoir les exploiter au maximum [Phillips, 1989]. Il s'agit de résines thermodurcissables, après polymérisation (passage de l'état liquide à l'état solide), elles subissent une réaction chimique irréversible.

On distingue trois types de résines employées couramment en génie civil :

Tableau 2.2 : Propriétés des différentes résines [ISIS Design Manual #3, 2009]

Époxyde	1,20-1,30	55,00-130,00	2,75-4,10	1,00-5,00
Polyester	1,10-1,40	34,50-103,50	2,10-3,45	5,00-12,00
Vinyle-ester	1,12-1,32	73,00-81,00	3,00-3,35	5,40-10,30

Les autres constituants, fillers et additifs, représentent en général 20 à 30% du poids de la résine.

2.3.2 Comportement structural des goujons

En 1996, les services des transports de l'Etat de l'Illinois ont réalisé plusieurs tronçons d'autoroutes équipées en goujons d'acier et de PRFV provenant de différents fournisseurs. Des contrôles périodiques du transfert de charge (LTE) ont été réalisés avec un déflectomètre à masse tombante (*Falling Weight Deflectometer*, FWD) sous une charge dynamique de 40 kN (1/2 ECAS, charge transmise par un pneumatique) tombant sur une plaque circulaire de 12 po (304,8 mm) de diamètre.

Les goujons suivant ont été employés dans les dalles :

- goujons d'acier de 38,1 mm revêtus d'époxy ;
- goujons de PRFV de 38,1 et 44 mm (RJD Industries) ;
- goujons de PRFV de 38,1 mm (Glasforms).

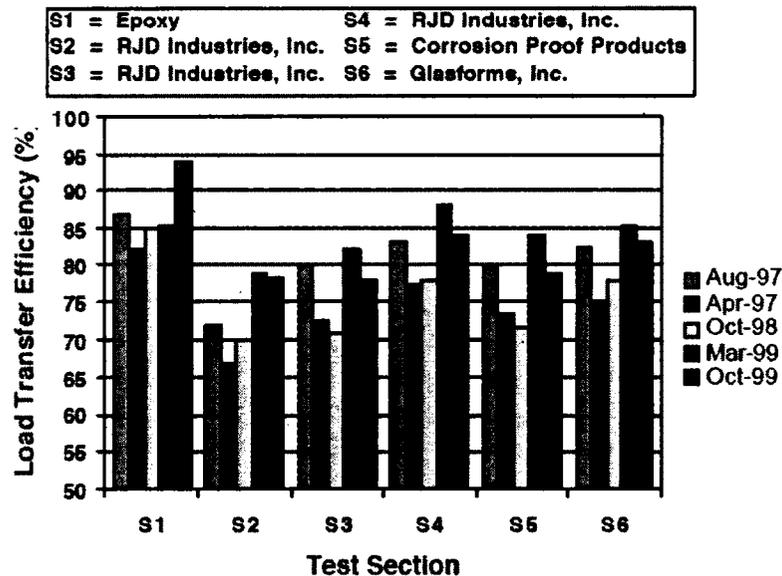


Figure 2.12 : Transferts de charge des différents goujons à différentes périodes [Smith, 2001]

Comme montrés sur la figure 2.12, tous les produits de PRFV continuent de garantir un transfert de charge de supérieur à 65% après 2 ans de service. Il résulte également de ces expérimentations que pour garantir les mêmes performances structurales que l'acier non

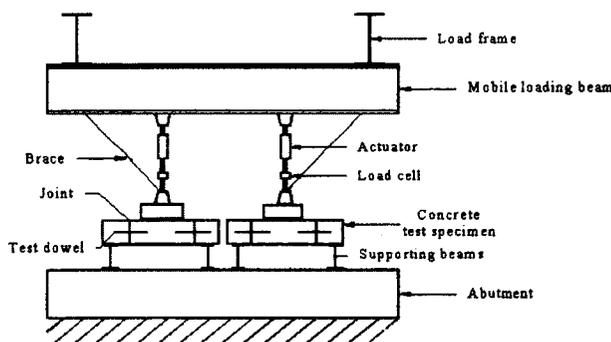
dégradé, un diamètre supérieur à celui de référence doit être employé pour équilibrer la différence des modules d'élasticité.

On observe également que le transfert de charge est supérieur à plus long terme, ceci dû à l'homogénéisation et la compaction du sol support augmentant dans les premières années de service après réalisation de la chaussée.

Porter et al. (2003) ont conduit une campagne d'essais structuraux de chargements cycliques sur des spécimens de dalles conformément à la modélisation de l'AASHTO (figures 2.13).

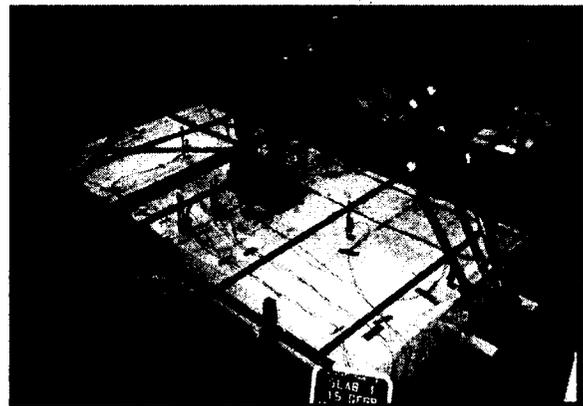
Les goujons suivant ont été utilisés (2 par joint avec un espacement de 300 mm) :

- goujons d'acier de 38,1 mm ;
- goujons d'acier de 38,1 mm revêtu d'époxy ;
- goujons de PRFV de 38,1 et 48,1 mm.



Side elevation view

a)



b)

Figures 2.13 : Montage de l'AASHTO a) théorique, b) expérimental [Porter, 2003]

Les résultats suivant ont été obtenus après plus de 2 000 000 de cycles de chargements à 130 kN (1/2 ECAS tridem + charge de contact) :

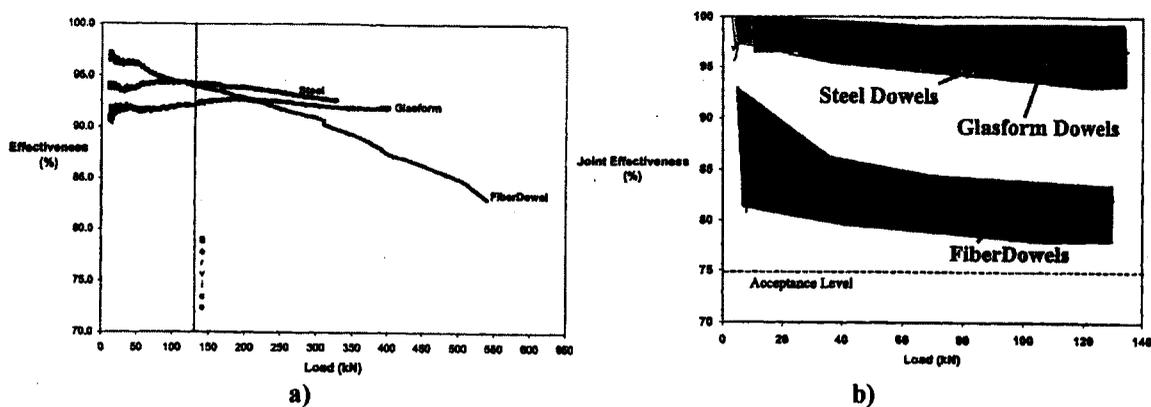
- transfert de charge LTE = 45% pour les goujons d'acier de 38,1 mm ;
- transfert de charge LTE = 40% pour les goujons de PRFV de 38,1 mm ;
- transfert de charge LTE = 50% pour les goujons de PRFV de 48,1 mm.

Cette étude confirme à nouveau que le diamètre des goujons de PRFV doit être augmenté vis-à-vis du goujon de référence. Les différences de modules en flexion et cisaillement entre l'acier et les PRFV doivent être pris en compte dans le design afin d'affiner celui-ci et

proposer une alternative de performance égale. Cette étude montre également que le plus faible module d'élasticité des produits PRF permet de réduire les contraintes développées autour du goujon à la face du joint et ainsi augmenter l'efficacité du transfert de charge. Lorsque l'on approche la charge de rupture, les spécimens de dalles équipés de goujons d'acier présentent une fissuration plus importante au niveau du joint due à la plus grande rigidité de l'acier développant plus de contraintes à l'interface goujon/béton.

Eddie et al. (2001) ont conduit des essais structuraux visant à évaluer sous charges statiques et cycliques le comportement de joints de chaussées équipés en différents types de goujons (*glasform GFRP*, *Fiberdowel GFRP*, *epoxy coated steel*). Les essais ont été réalisés sur des spécimens de dalles de 2 pieds de largeur (609,6 mm) par 8 pieds de longueur (2,4384 m), d'une épaisseur de 10 po (25,4 cm) caractérisant une section de chaussée courante supportant un double pneumatique (demi-essieu). Les dalles reposent sur une base réalisée en matériaux granulaires compactés présentant une portance de 133 MPa/m, simulant une assise rigide de chaussée à très fort trafic. Les spécimens comportent des joints de construction ($e = 0$ mm). Des essais de chargements monotoniques jusqu'à la rupture des spécimens ainsi que des chargements cycliques à une fréquence de 6 Hz ont été réalisés.

Leurs résultats sont présentés sur les figures suivantes :



Figures 2.14 : Efficacité du joint sous chargement statique a) initial, b) jusqu'à 1 000 000 de cycles [Eddie et al., 2001]

Les résultats obtenus sont très satisfaisant, assurant une efficacité du joint de plus de 90% sous charge statique de service et de plus de 75% sous chargement cyclique (plus de 1 000 000 de cycles). Il en résulte que des performances égales ou supérieures à celles de l'acier sont obtenues avec l'emploi de goujons de PRFV de 38,1 mm au lieu de 31,8 mm d'acier pour des chargements cycliques représentatifs de conditions de service sévères (½ essieu tridem de 110 kN).

2.3.3 Durabilité

Les produits en PRFV sont insensibles à la corrosion et résistent très bien aux environnements acides. Ils sont plus sensibles aux environnements très alcalins. De ce fait, ils peuvent être affectés par les eaux (internes au béton, intempéries) car elles ont un pH plus basique. Les ions alcalins et l'humidité peuvent diffuser à travers la matrice et altérer les performances mécaniques des barres de PRFV [Robert et al., 2008]. Les détériorations apparaissent d'abord lorsque l'eau transportant des ions pénètre la structure de chaussée et se diffuse dans la matrice comme montré sur la figure suivante :

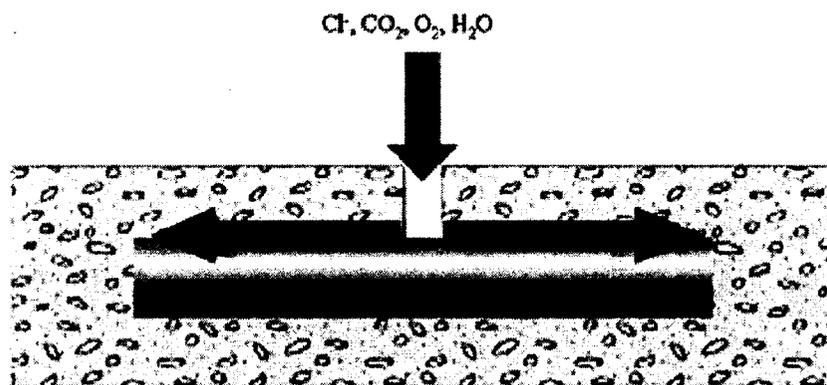


Figure 2.15 : Infiltration des ions agressifs par le joint de chaussée ou une fissure [Park et al., 2008]

La détérioration de la matrice résulte des réactions suivantes :

La diffusion des ions hydroxydes (OH^-) des environnements basiques à l'état de saturation peut entraîner une hydrolyse de la matrice :

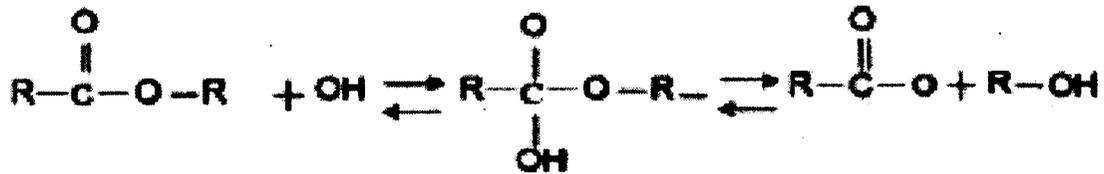
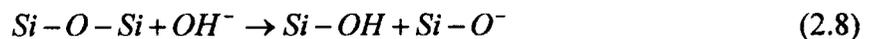


Figure 2.16 : Hydrolyse de la matrice par les ions OH⁻ [Park et al., 2008]

En solution aqueuse ou alcaline, on assiste aussi à un lessivage par les ions alcalins qui peuvent dissoudre les fibres selon la réaction suivante :



Les ions hydroxydes altèrent également les liaisons moléculaires Si-O-Si :



La formation d'hydroxyde peut attaquer la surface des fibres de verre, il en résulte une augmentation de la rugosité de cette dernière.

La zone d'interface fibre/résine est d'une relative faible adhérence compte tenu de son épaisseur (de l'ordre de 1 µm) et de son hétérogénéité. Des produits d'hydrolyse peuvent se former entre les filaments, la croissance et l'augmentation de la concentration de ces produits entre les monofilaments de verre au niveau de l'interface altère l'adhésion fibres/matrice (délaminations), accompagnés d'un phénomène de plastification [Murphy et al., 1999]. L'interface matrice/fibres et donc le premier facteur de durabilité.

Dejke et al. (1999) ont démontré que certaines fibres de verre se dégradent en présence d'eau et que l'humidité pouvait diminuer la température de transition vitreuse (T_g) de la résine polymère en agissant comme un plastifiant et réduire potentiellement la résistance en flexion des barres de PRFV. La réaction des composites de PRF aux alcalis du béton est un des soucis majeurs des ingénieurs en conception soucieux de la durabilité de ces nouveaux matériaux. L'environnement typiquement alcalin du béton, qui dépend du mélange de conception de béton et du type de ciment utilisé endommage les fibres de verre en diminuant leur dureté et leur résistance [Diamond, 1981 ; Taylor, 1987].

Park et al. (2008) ont entrepris des essais de cisaillement interlaminaire sur des échantillons elliptiques de 50 x 34 mm de goujons de PRFV immergés durant quatre mois dans une solution alcaline à deux températures (NaOH + KOH + Ca(OH)₂, pH=12,6) simulant les conditions environnementales des goujons dans les chaussées. Voici leurs conclusions :

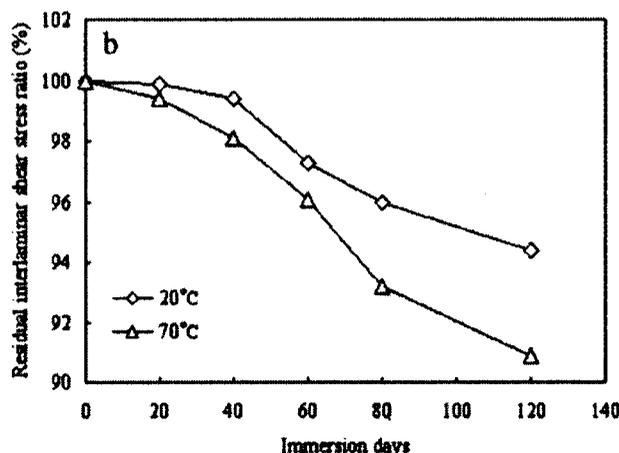
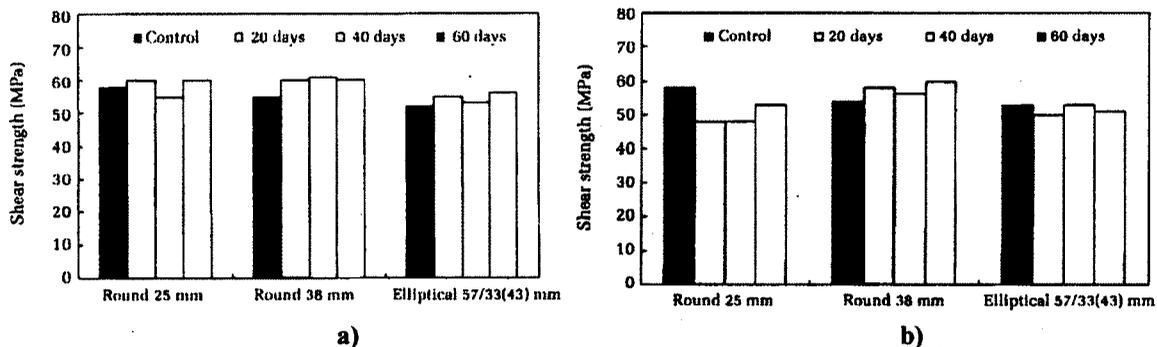


Figure 2.17 : Propriétés interlaminaires résiduelles (%) [Park et al., 2008]

L'effet du temps et de la température tend à accentuer les dégradations, permettant d'établir des modèles de prédictions des dégradations sur de plus longues périodes de service.

Après 4 mois d'immersion en solution alcaline et à haute température, l'intégrité structurale des goujons est assurée à plus de 90%.

Won et al. (2006) ont entrepris des essais de durabilité sur différents goujons de PRFV conditionnés en solutions aqueuse et alcaline à 70°C durant 2 mois. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes :



Figures 2.18 : Résistance au cisaillement à 70°C a) en solution aqueuse et b) en solution alcaline [Won et al., 2006]

Aucune perte de résistance n'est constatée après 60 jours à 70°C dans l'eau, ni aucun phénomène de plastification.

Une sensible baisse est constatée pour les goujons de 25 mm après conditionnement à 70°C en solution alcaline. L'intégrité structurale reste très satisfaisante et les autres diamètres ne sont pas affectés, probablement grâce à une diffusion plus lente du fait du plus gros diamètre.

Des essais en solution saline de CaCl₂ à 3% ont aussi été réalisés ainsi que des essais de gel/dégel de 300 cycles, simulant les conditions d'exploitation hivernales. Les résultats sont présentés sur les figures suivantes :

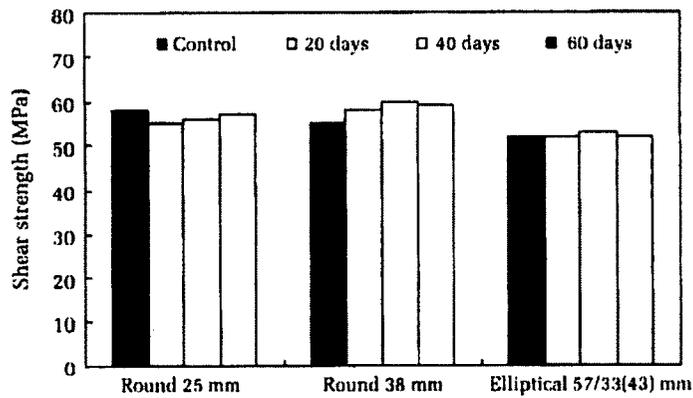


Figure 2.19 : Résistance au cisaillement en solution saline à 70°C [Won et al., 2006]

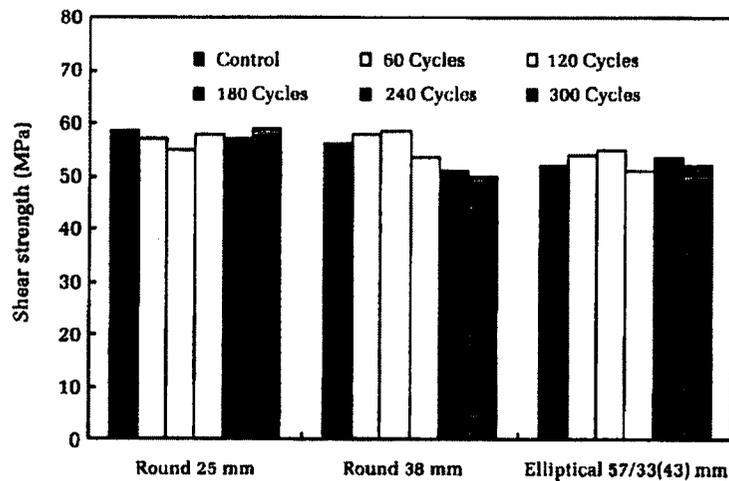


Figure 2.20 : Résistance au cisaillement interlaminaire après des cycles de gel/dégel [Won et al., 2006]

Les solutions salines n'ont aucune incidence à 60 jours sur l'intégrité structurale des goujons. Plus de 90% de la résistance initiale est assurée après 300 cycles de gel/dégel à saturation d'eau.

2.3.4 Méthodes de prédictions

De nombreuses méthodes de vieillissement par conditionnement en solutions alcalines à différentes températures sont couramment utilisées par les chercheurs pour établir des modèles de prédictions basés sur les théories d'Arrhenius considérant la température comme facteur principal d'accélération des dégradations. Il est considéré que si un phénomène de dégradation seul est observé dans une certaine période et plage de température sans qu'aucun autre phénomène n'apparaisse, alors il est possible d'établir une corrélation entre dégradation et température. L'effet du temps pourra alors être augmenté en augmentant la température et effectuer ainsi des essais de vieillissement sur plusieurs semaines prédisant les propriétés à plusieurs dizaines d'années.

Selon l'équation d'Arrhenius, le phénomène cinétique de réaction est relié à la température de vieillissement :

$$k = Ae^{\frac{Ea}{RT}} \quad (2.9)$$

Avec k : constante reliée au taux de dégradation

Ea : l'énergie d'activation de la réaction de dégradation

R : la constante des gaz parfaits

T : la température absolue

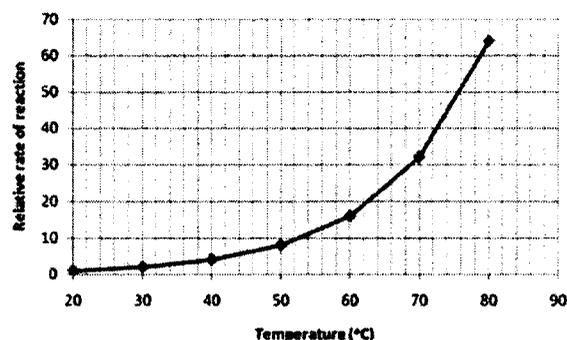


Figure 2.21 : Évolution du degré de réaction k en fonction de la température [Robert et al., 2008]

Une procédure utilisant le concept d'Arrhenius a été proposée par Deijke (1999). Cette procédure repose sur la détermination de facteur de changement de temps (FCT). Le FCT est déterminé en utilisant la relation d'Arrhenius entre des essais accélérés et d'autres non accélérés :

$$FCT = e^{B \left(\frac{1}{T_1 + 273,15} - \frac{1}{T_2 + 273,15} \right)} \quad (2.10)$$

*Avec B : constante déterminée à l'aide du FCT et de deux courbes connues
 T_1 et T_2 sont les températures (°C) entre lesquelles le FCT est calculé*

Tout d'abord, deux courbes de rétention de la résistance en fonction du temps sur une échelle logarithmique sont tracées, pour deux vieillissements accélérés distincts. Théoriquement, les deux courbes devraient être parallèles entre elles, puisque le mécanisme de dégradation est supposé être le même peu importe le conditionnement. Le FCT est le ratio des temps requis pour dégrader un même matériau au même degré, mais à deux températures différentes. La constante B peut aisément être calculée une fois le FCT déterminé ; elle est caractéristique du matériau.

Par exemple, pour les travaux de Won et al. (2006) présentés précédemment, la méthode de Litherland permet d'établir une relation entre le temps d'exposition en solution, la température d'exposition et la durée équivalente sous conditions naturelles à 10,4°C pour ces goujons de PRFV :

$$N/C = 0,098 \times e^{(0,05587T)} \quad (2.11)$$

*Avec N = durée d'exposition sous conditions naturelles (jours)
C = durée d'exposition en solution (jours)
T = température d'exposition (°F)*

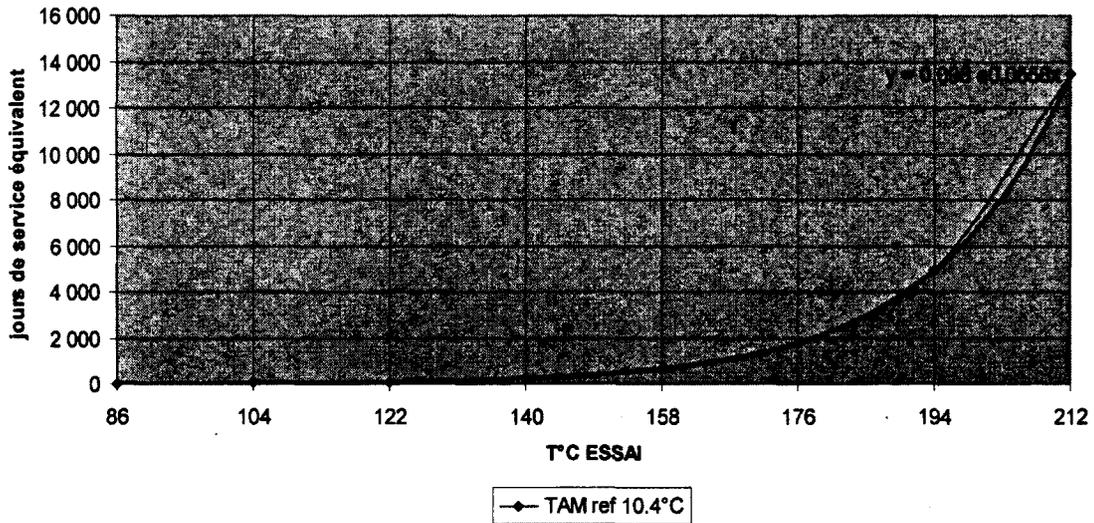


Figure 2.22 : Simulation jours de service à 10,4°C/jours d'essai en fonction de la température

On observe sur les figures 2.21 et 2.22 qu'à partir de 50°C, le phénomène cinétique croît fortement. Pour une augmentation de 10°C on double la période théorique de service.

Pour l'étude de Won et al. (2006), les goujons présentant une performance résiduelle de plus de 85% à 70°C après 60 jours garantirait cette performance après plus de 100 ans pour une TAM de 10,4°C (N/C = 661 j).

2.3.5 Limites

Les méthodes de vieillissement employées doivent être relativisées premièrement car elles reposent sur l'hypothèse qu'un seul phénomène de dégradation apparaît durant la période de vieillissement et d'autre part les températures moyennes annuelles déterminées ne sont pas représentatives des conditions réelles, ne tenant pas compte des écarts de températures.

Sur les figures 2.21 et 2.22, on observe que l'augmentation de la vitesse de réaction est presque linéaire entre la température ambiante et 50°C, tandis qu'elle devient exponentielle au fur et à mesure que la température s'élève. Il y a alors un phénomène thermomécanique qui s'ajoute au phénomène cinétique, faussant ainsi les équations basées sur la théorie d'Arrhenius. Les composites de PRF sont composés de fibres de verre très stables à hautes

températures. Cependant, la phase polymère ne supporte pas de telles températures. Quand la température de transition vitreuse de la résine, est atteinte, la structure et le comportement de la résine change profondément, passant d'un état vitreux à un état viscoélastique. Il a été observé que certaines propriétés des résines commencent à être affectées à des températures aussi basses que $T_g - 50^\circ\text{C}$ [Foster et al., 2008]. D'autre part, la grande différence entre les coefficients d'expansion thermique (CET) produit un effort de cisaillement principalement situé dans la région de l'interface. Cela peut induire un phénomène de décollement/délaminage des fibres et l'apparition de vide à l'interface. Par conséquent, le phénomène thermomécanique de dégradation serait amplifié quand des températures de vieillissement trop élevées seraient utilisées, menant à une sur-dégradation du matériau composite [Robert et al., 2008].

Wang (2005) a démontré que les hautes températures agissent sur la diffusion d'humidité et le taux d'absorption (figure 2.23), indiquant encore une fois l'augmentation du phénomène thermomécanique au-delà de 60°C .

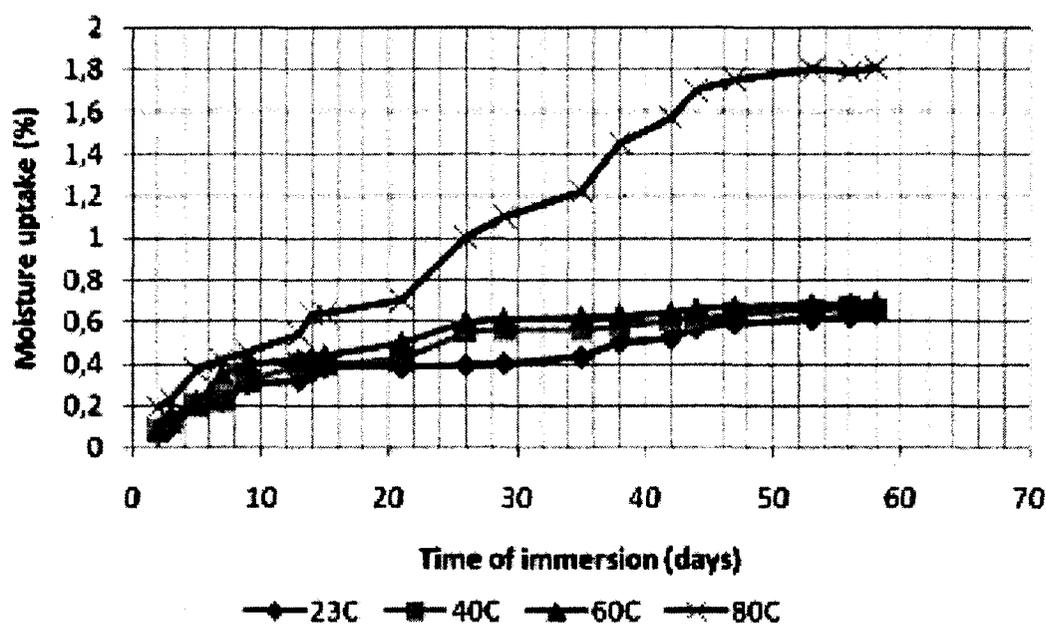


Figure 2.23 Absorption d'eau de barres de PRFV dans l'eau à différentes températures [Wang, 2005]

Le choix de la température est un paramètre essentiel afin de faire une prévision réaliste, les dernières études montrent que des températures trop élevées faussent les résultats faisant apparaître des phénomènes de dégradation supplémentaires [Benmokrane et al., 2008].

Chapitre 3 Programme expérimental

3.1 Phase I : Caractérisation mécanique et physique des goujons de PRFV

Cette première phase caractérise les propriétés mécaniques et physiques des goujons de PRFV fabriqués à partir de fibres de verre continues de type E imprégnées avec des résines vinylester ou polyester par un procédé de pultrusion fermée. Les goujons ont été manufacturés par l'entreprise Pultrall Inc. (Thetford Mines, Québec, Canada), les diamètres et types de résines suivants ont été caractérisés :

- 25,4 mm résine Vinylester (lot 105201)
- 28,6 mm résine Vinylester (lot 105203)
- 31,8 mm résine Vinylester (lot 105205)
- 34,9 mm résine Vinylester (lot 104004)
- 38,1 mm résine Vinylester (lot 105100)
- 41,3 mm résine Vinylester (lot 105101)
- 44,5 mm résine Vinylester (lot 105102)

- 25,4 mm résine Polyester (lot 105202)
- 28,6 mm résine Polyester (lot 105204)
- 31,8 mm résine Polyester (lot 105206)
- 34,9 mm résine Polyester (lot 104005)

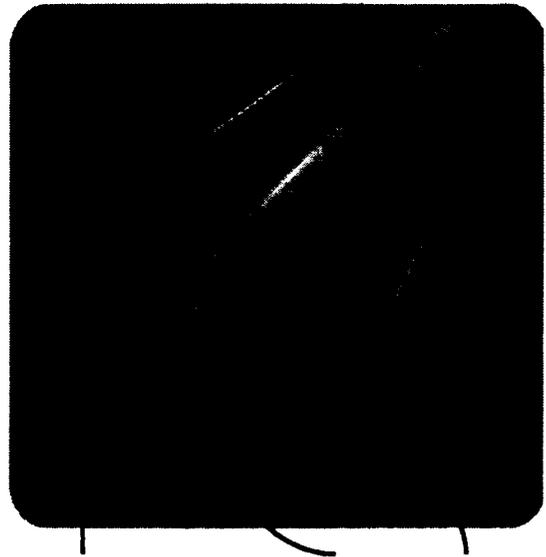


Figure 3.1 : Goujons d'acier, de PRFV polyester et vinylester

3.1.1 Caractérisation mécanique

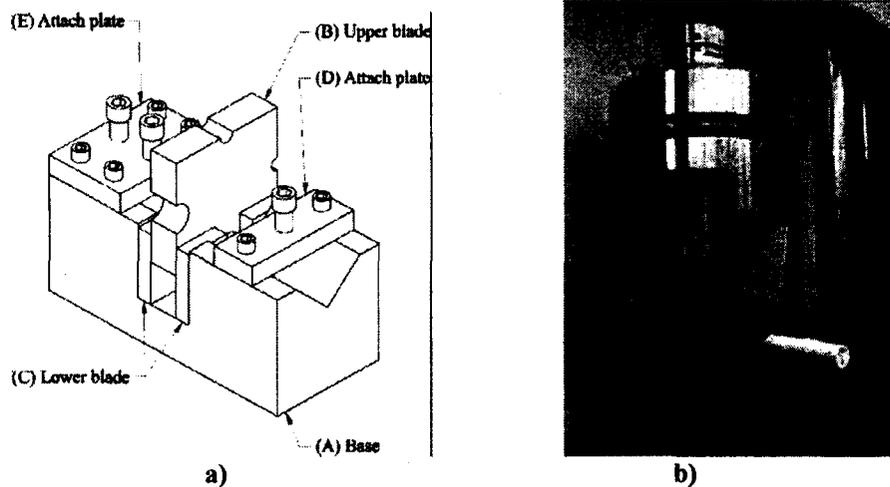
Les essais mécaniques réalisés sur les goujons de PRFV ont pour objectifs l'établissement de spécifications à destination de l'industrie Pultrall et du MTQ, la détermination des caractéristiques initiales des matériaux avant les phases de vieillissement ainsi qu'en vue de la conception (essais représentatifs des comportements en service des goujons). Les essais mécaniques suivants ont été réalisés :

Tableau 3.1 : Essais de caractérisation mécanique

	Essais		
	Cisaillement direct	Flexion par 4 points	Cisaillement interlaminaire
Paramètre mesuré	<i>résistance au cisaillement direct</i>	<i>résistance et module en flexion</i>	<i>résistance au cisaillement interlaminaire</i>
	<i>sollicitation des fibres</i>	<i>sollicitation des fibres et de l'interface</i>	<i>sollicitation de l'interface</i>

3.1.1.1 Essai de Cisaillement Direct

Le principal mode de fonctionnement des goujons en service est le cisaillement direct. Des essais de résistance au cisaillement direct ont été réalisés selon la méthode d'essai B4 du guide de l'American Concrete Institute (ACI) « *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures* » [ACI 440.3R-04, 2004], conformément au code CSA S806-02 « *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers* » [CSA S806-02, 2002]. Le montage consiste en un support de 230 x 100 x 110 mm en acier D2, usiné avec un *V-shape* permettant de contenir tous les diamètres possibles. Des plaques de cisaillement ont été usinées pour chaque diamètre et sont espacées de 50 mm de face à face permettant le double cisaillement direct du goujon par une lame couteau comme illustré sur les figures suivantes :



Figures 3.2 : Montage de cisaillement direct

Pour chaque diamètre et type de résine, six spécimens d'une longueur de 300 mm sont testés à température du laboratoire ($23 \pm 2^\circ\text{C}$, $50 \pm 10\%$ d'humidité relative) à l'aide de presses MTS 810 d'une capacité de 500 et 1 000 kN. Le taux de déplacement choisi est de 1,5 mm/min soit 0.025 mm/s garantissant un taux de chargement entre 30 et 60 MPa/min, jusqu'à rupture du spécimen. L'acquisition des données est faite à l'aide du système MTS FlexTest SE géré par ordinateur, le paramètre mesuré est la contrainte ultime de cisaillement direct, calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\tau_u = \frac{P_s}{2A} \quad (3.1)$$

Avec τ_u : contrainte ultime de cisaillement direct (MPa)

P_s : charge à la rupture (N)

A : section transversale du spécimen (mm^2)

L'écart type pour chaque lot testé est calculé avec l'équation suivante :

$$s = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)}{(n-1)}} \quad (3.2)$$

Avec s : écart type estimé

x_i : valeur du spécimen

\bar{x} : valeur moyenne déterminée sur n spécimens

n : nombre de spécimens étudiés

3.1.1.2 Essai de Flexion par 4 points

De part la longueur des goujons dans le béton de part et d'autre du joint, le second mode de fonctionnement structural est la flexion (accentué avec les joints d'expansion thermique). Les goujons de PRFV ont été testés selon la méthode « *New method for testing fiber reinforced polymer rods under flexure* » [Zhang et al., 2007] conformément à la norme ASTM D 4476-03 « *Standard Test Method for Flexural Properties of Fiber Reinforced Pultruded Plastic Rods* ». Cette nouvelle méthode d'essai par 4 points est plus appropriée aux barres composites. Elle permet à la zone de rupture d'apparaître aux zones de faiblesse du matériau alors que l'essai par 3 points provoquant une rupture sous le point d'application de la charge.

Des spécimens de 1066,8 mm de longueur (42 po) sont caractérisés avec deux espacements différents des appuis (*span*), compris entre 16 et 24 fois le diamètre du spécimen permettant la sollicitation en flexion du composite (figure 3.3). Des poulies supports et de chargement en acier ont été usinées pour chaque diamètre (figure 3.4).

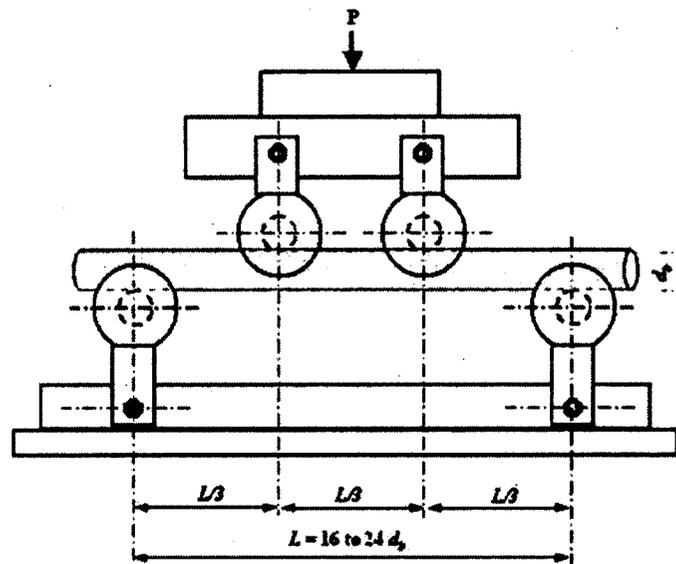


Figure 3.3 : Montage de flexion par 4 points

$L/3 = 600 \text{ mm}$ pour les diamètres de 25,4 à 34,9 mm
 900 mm pour les diamètres de 38,1 à 44,5 mm

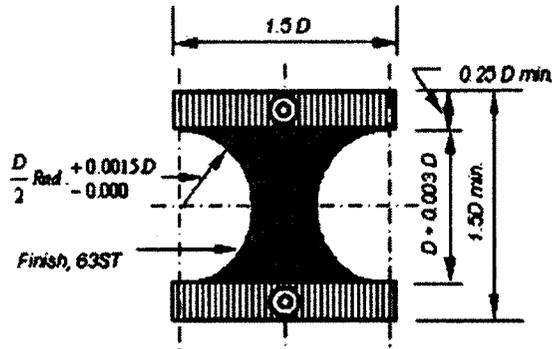


Figure 3.4 : Poulie de support et chargement

Pour chaque diamètre et type de résine, six spécimens de 1066,8 mm de longueur (42 po) sont caractérisés à une température de laboratoire ($23 \pm 2^\circ\text{C}$, $50 \pm 10\%$ d'humidité relative) à l'aide d'une presse Baldwin d'une capacité de 1 800 kN (400,000 lbs). Le taux de déplacement choisi est de 60 mm/min soit 1 mm/s garantissant un taux de chargement entre 250 et 350 MPa/min, jusqu'à rupture du spécimen en tension, compression ou pour une microdéformation des fibres de 5%. L'acquisition des données est faite à l'aide du système MTS FlexTest SE géré par ordinateur, le paramètre mesuré est la contrainte ultime de flexion, calculé avec l'équation suivante :

$$\sigma_u = \frac{2PL}{3\pi R^3} \quad (3.3)$$

Avec σ_u : contrainte ultime de flexion à mi-portée (MPa)

P : charge à la rupture (N)

L : distance entre les appuis (mm)

R : rayon du goujon

Le module d'élasticité est calculé avec l'équation suivante pour une valeur P choisie et la déflexion Y mesurée au moyen d'un extensomètre LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Le matériau étant parfaitement élastique, le module est calculé pour une force comprise entre 30 et 40% de la charge ultime, évitant de dégrader le LVDT au moment de la rupture des fibres :

$$E = \frac{23L^3}{1296I} \times \frac{P}{Y} \quad (3.4)$$

$$\text{Avec } I = \frac{\pi R^4}{4} \quad \text{moment quadratique de l'échantillon}$$

La microdéformation des fibres inférieures à la rupture est calculée avec l'équation suivante :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_u}{E} \quad (3.5)$$

La microdéformation théorique a été validée expérimentalement en équipant un lot de goujons de jauges de déformations de 10 mm de longueur.

L'écart type pour chaque lot testé est calculé avec l'équation suivante :

$$s = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)}{(n-1)}} \quad (3.6)$$

Avec s : écart type estimé

x_i : valeur du spécimen

\bar{x} : valeur moyenne déterminée sur n spécimens

n : nombre de spécimens étudiés

3.1.1.3 Essai de Cisaillement Interlaminaire (*Short Beam Test*)

L'essai de cisaillement interlaminaire, ou essai sur poutre courte, permet de caractériser la performance mécanique de l'interface fibre/résine. La distance entre appuis de cet essai permet de développer un cisaillement horizontal et sollicite l'adhésion des fibres à la résine. Cet essai est particulièrement pertinent pour caractériser une dégradation de l'interface, notamment après des essais de résistance chimique. Les goujons de PRFV ont été caractérisés au cisaillement interlaminaire selon la norme ASTM D 4475-02 « *Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method* ». Le montage de flexion a été utilisé pour cet essai avec des distances entre appuis réduites :

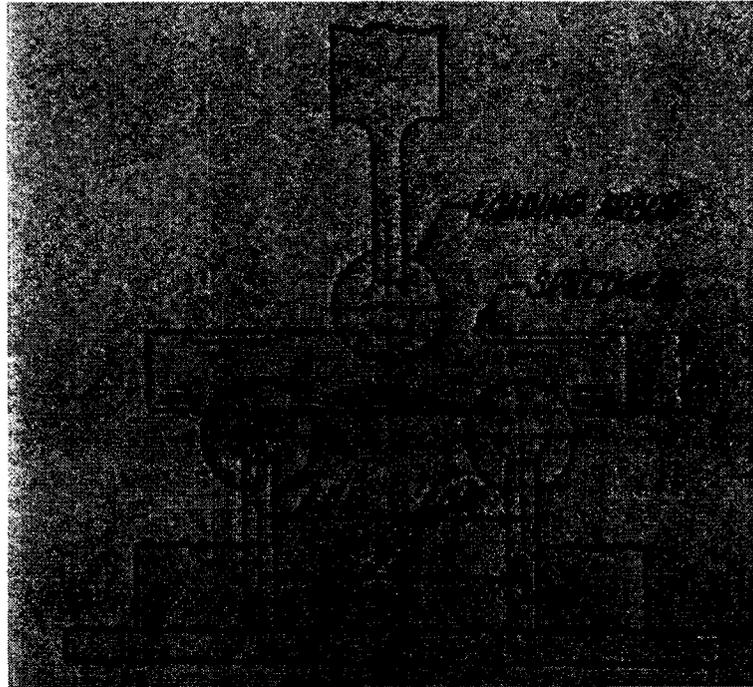


Figure 3.5 : Montage de cisaillement interlaminaire [ASTM D 4475-02]

Pour chaque diamètre et type de résine, six spécimens sont étudiés à température du laboratoire ($23 \pm 2^\circ\text{C}$, $50 \pm 10\%$ d'humidité relative) à l'aide d'une presse Baldwin d'une capacité de 1 800 kN (400,000 lbs). Le taux de déplacement choisi est de 1,3 mm/min soit 0.02 mm/s comme préconisé par la norme. L'acquisition des données est faite à l'aide du système MTS FlexTest SE géré par ordinateur. Les spécimens ont été découpés aux longueurs suivantes selon les spécifications de la norme pour une longueur entre appuis de 5 à 6 diamètres :

Tableau 3.2 : Dimensions des échantillons et de l'essai

Diamètre nominal	Longueur de spécimen	Distance entre 2 appuis (<i>span</i>) ($3D < L < 6D$)
25,4 mm	7 po ou 177,8 mm	6 po ou 152,4 mm
28,6 mm	7 po ou 177,8 mm	6 po ou 152,4 mm
31,8 mm	7,25 po ou 184,1 mm	6 po ou 152,4 mm
34,9 mm	9,5 po ou 241,3 mm	8 po ou 203,2 mm
38,1 mm	9,5 po ou 241,3 mm	8 po ou 203,2 mm
41,3 mm	9,5 po ou 241,3 mm	8 po ou 203,2 mm
44,5 mm	9,75 po ou 247,6 mm	8 po ou 203,2 mm

Le paramètre mesuré est la contrainte ultime de cisaillement interlaminaire, calculé avec l'équation suivante :

$$S_u = \frac{0,849P}{d^2} \quad (3.7)$$

Avec S_u : contrainte ultime de cisaillement interlaminaire (MPa)
 P : charge à la rupture (N)
 d : diamètre du spécimen (mm)

L'écart type pour chaque lot testé est calculé avec l'équation suivante :

$$s = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)}{(n-1)}} \quad (3.8)$$

Avec s : écart type estimé
 x_i : valeur du spécimen
 \bar{x} : valeur moyenne déterminée sur n spécimens
 n : nombre de spécimens étudiés

3.1.2 Propriétés physiques

Des essais de caractérisation des propriétés physiques des goujons ont été réalisés selon le document « *Specifications for product certification of fibre reinforced polymers (FRPs) as internal reinforcement in concrete structures* » d'ISIS Canada, et se réfèrent aux spécifications du document CSA S-807 « *FRP Product Specification* ».

Les propriétés physiques suivantes ont été déterminées :

- Taux de fibres selon la norme ASTM D 3171 « *Constituent content of composite* », Méthode I, Procédure G ;
- Absorption d'eau selon la norme ASTM D 570 « *Water Absorption of Plastics* » ;
- Taux de cure (polymérisation) selon la norme ASTM D 5028 « *Curing Properties of Pultrusion Resin by Thermal Analysis* » ;
- Température de transition vitreuse selon la norme ASTM D 3418 « *Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry (DSC)* » ;
- Coefficients de dilatation thermique selon la norme ASTM E 831 « *Linear Thermal Expansion of Solids Materials by Thermo-mechanical Analysis (TMA)* » ;
- Densité selon la norme ASTM D 792 « *Density and Specific Gravity of Plastics by Displacement* » ;
- Pénétration (connectivité des pores) selon la norme ASTM D 5117-03 « *Standard Test Method for Dye Penetration of Solid Fiberglass Reinforced Pultruded Stock* ».

- **Taux de fibres**

Le taux de fibres de verre est déterminé en éliminant physiquement la résine par méthode de pyrolyse. Pour chaque diamètre et type de résine, trois spécimens d'une longueur de 76,2 mm (3 po) sont caractérisés par pyrolyse à 600°C.

Le taux de fibre est calculé avec l'équation suivante :

$$\text{Taux de fibres (\%)} = 100 \times \frac{P_f}{P_s} \quad (3.9)$$

Avec P_f : masse des fibres après pyrolyse

P_s : masse de l'échantillon sec avant pyrolyse

- **Absorption d'eau**

Pour chaque diamètre et type de résine, trois spécimens d'une longueur de 76,2 mm (3 po) sont caractérisés par immersion dans l'eau durant trois semaines à 50°C.

Le taux d'absorption d'eau est calculé avec l'équation suivante :

$$W = 100 \times \frac{P_s - P_d}{P_d} \quad (3.10)$$

Avec W : taux d'absorption d'eau (%)

P_s : masse de l'échantillon saturé

P_d : masse de l'échantillon sec

- **Taux de cure (polymérisation)**

Pour chaque diamètre et type de résine, trois spécimens de 40 à 60 mg sont testés. L'enthalpie de polymérisation est obtenue par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) puis comparée à celle de la résine pure, tenant compte de la fraction massique de résine du spécimen. La température du four varie de la température ambiante à 220°C avec un taux d'augmentation thermique de 20°C/min.

Le taux de cure est calculé avec l'équation suivante :

$$\text{Polymérisation (\%)} = 100 - \frac{E_{mes}}{P \times (1 - F)} \times \frac{1}{E} \quad (3.11)$$

Avec E_{mes} : enthalpie mesurée

P : masse de l'échantillon (g)

F : taux de fibre massique

E : enthalpie de polymérisation de la résine (244J/g pour PE ; 256J/g pour VE)

- Température de transition vitreuse

Pour chaque diamètre et type de résine, trois spécimens de 40 à 60 mg sont testés par calorimétrie différentielle à balayage (DSC). La température du four varie de la température ambiante à 220°C avec un taux d'augmentation thermique de 20°C/min. Après une certaine température, on obtient une chute du flux de chaleur, ceci se produit lorsque le polymère passe par la phase de transition vitreuse :

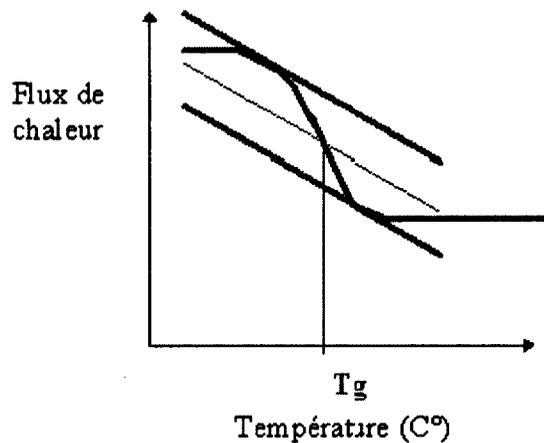


Figure 3.6 : Phase de transition vitreuse

- Coefficients d'expansion thermique

Pour chaque diamètre et type de résine, trois échantillons cubiques de 3 à 6 mm sont testés par analyse thermomécanique (TMA). L'acquisition se fait entre -35°C et +60°C avec une variation thermique de 3°C/min, les échantillons sont soumis à une contrainte négligeable.

- **Densité apparente**

Pour chaque diamètre et type de résine, trois spécimens d'une longueur de 76,2 mm (3 po) sont caractérisés. La densité apparente est calculée avec l'équation suivante :

$$\rho = \frac{P_s}{P_s + P_w - P_{s+w}} \quad (3.12)$$

Avec P_s : masse de l'échantillon sec

P_w : masse du cylindre contenant eau

P_{s+w} : masse du cylindre contenant eau+échantillon

- **Essai de pénétration (wicking)**

Trois spécimens de 25,4 mm de longueur (1 po) pour chaque type de goujons sont évalués par pénétration capillaire d'une solution de fuchsine à 1% pendant 30 minutes.

Les essais nécessitant une analyse par DSC sont réalisés à l'aide d'un analyseur DSC Q10 de TA INSTRUMENTS comme montré sur la figure suivante :

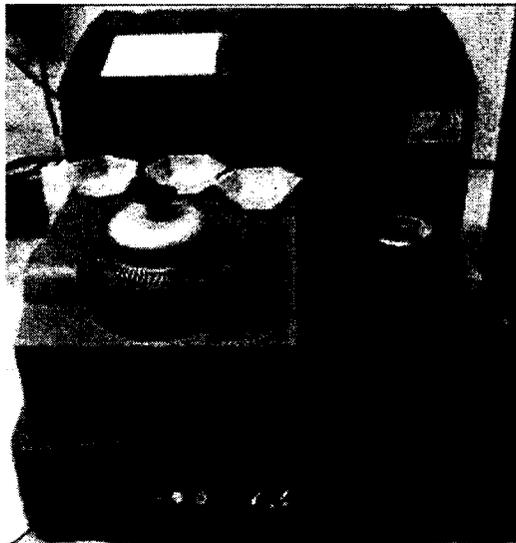
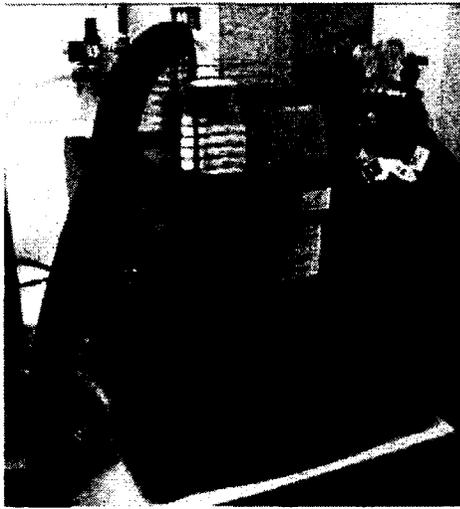


Figure 3.7 : Analyseur DSC Q10

Les essais nécessitant une analyse TMA sont réalisés à l'aide d'un analyseur TMA Q400 de TA INSTRUMENTS comme montré sur les figures suivantes :



a)



b)

Figures 3.8 : Analyseur TMA Q400

3.2 Résultats et analyse Phase I

3.2.1 Caractérisation mécanique

3.2.1.1 Essai de Cisaillement Direct

Les résultats initiaux de résistance au cisaillement direct sont présentés au tableau 3.3 :

Tableau 3.3 : Résistance au cisaillement direct à température ambiante

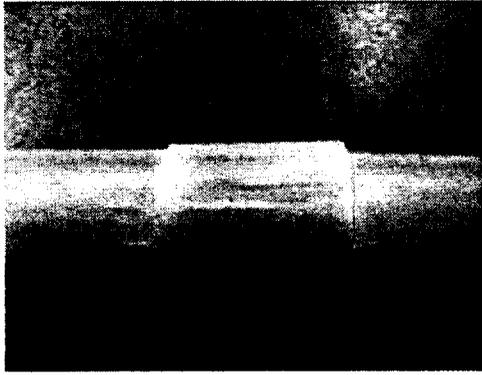
résine	d (mm)	A (mm ²)	T_u (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)
vinylester	25,4	506,71	167,49	2,42	1,44
	28,6	642,42	193,98	2,27	1,17
	31,8	794,23	160,29	3,34	2,08
	34,9	956,62	184,34	1,81	0,98
	38,1	1 140,09	173,43	3,19	1,84
	41,3	1 339,65	196,91	3,65	1,85
	44,5	1 555,28	181,87	2,85	1,56
polyester	25,4	506,71	153,58	1,49	0,97
	28,6	642,42	165,49	3,72	2,25
	31,8	794,23	150,82	1,31	0,87
	34,9	956,62	163,68	4,44	2,71

Les résultats obtenus montrent que :

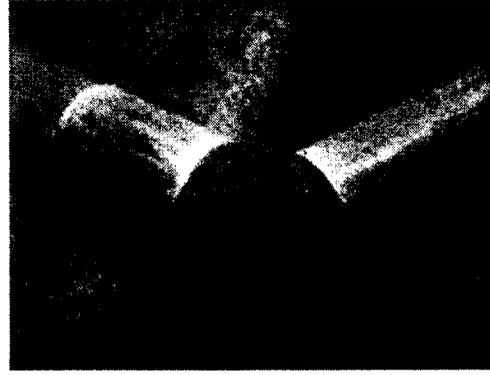
- Les contraintes ultimes au cisaillement direct sont comprises entre 150 et 200 MPa ;
- Les goujons manufacturés avec une résine polyester présentent une résistance de 8 à 12% inférieure à ceux en vinylester ;
- Le comportement des goujons reste élastique jusqu'à la rupture.

En comparaison, des goujons d'acier revêtus d'époxy de 28,6 et 38,1 mm ont été étudiés et présentent tous deux une contrainte ultime de 240 MPa avec un écart type <1 MPa.

Tous les spécimens étudiés ont présentés une rupture parfaite par cisaillement (figures 3.9 et 3.10). La résistance du goujon dépend directement de la résistance au cisaillement des fibres, on observe des élongations et déchirures de la résine autour des fibres.

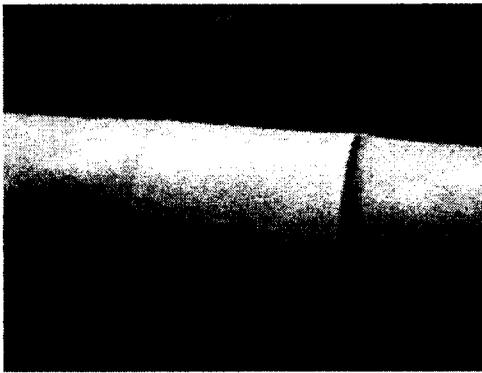


a)

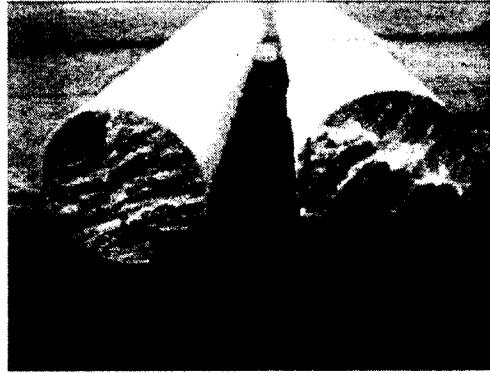


b)

Figures 3.9 : Rupture en cisaillement de goujons de PRFV vinylester



a)



b)

Figures 3.10 : Rupture en cisaillement de goujons de PRFV polyester

Les Figures 3.11 et 3.12 présentent la variation des contraintes de cisaillement ultimes en fonction de la température de conditionnement. Les goujons sont conditionnés pendant 72 heures à différentes températures et caractérisés immédiatement, conservant la température de conditionnement :

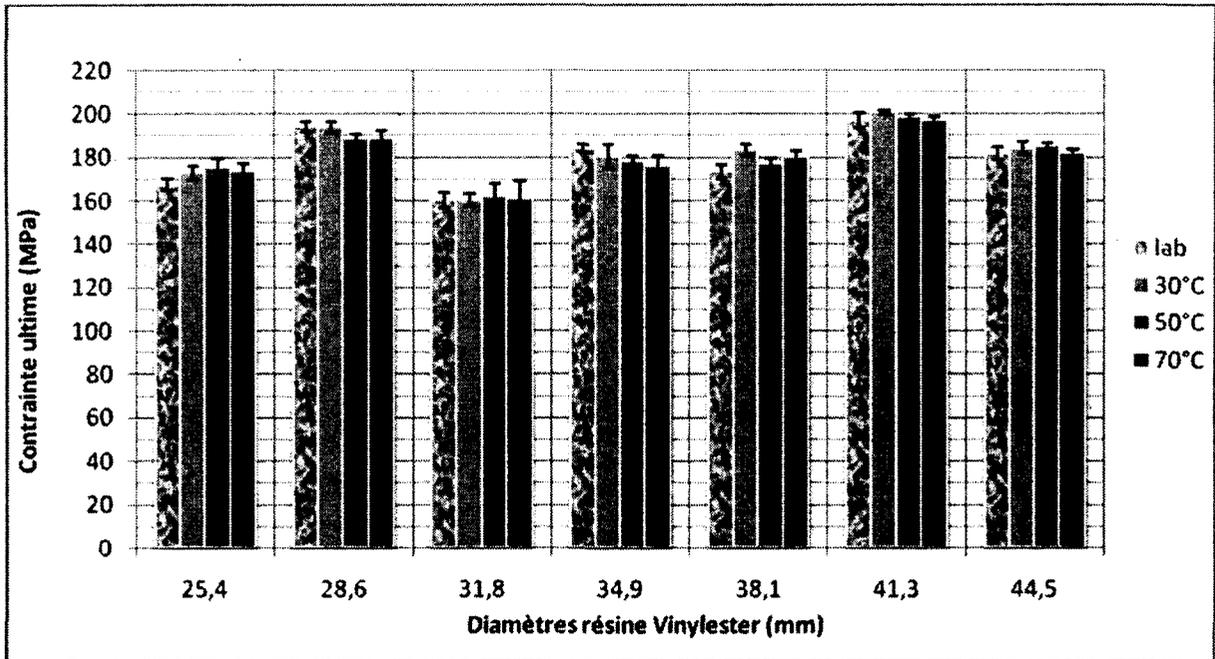


Figure 3.11 : Résistance au cisaillement direct à différentes températures (résine vinylester)

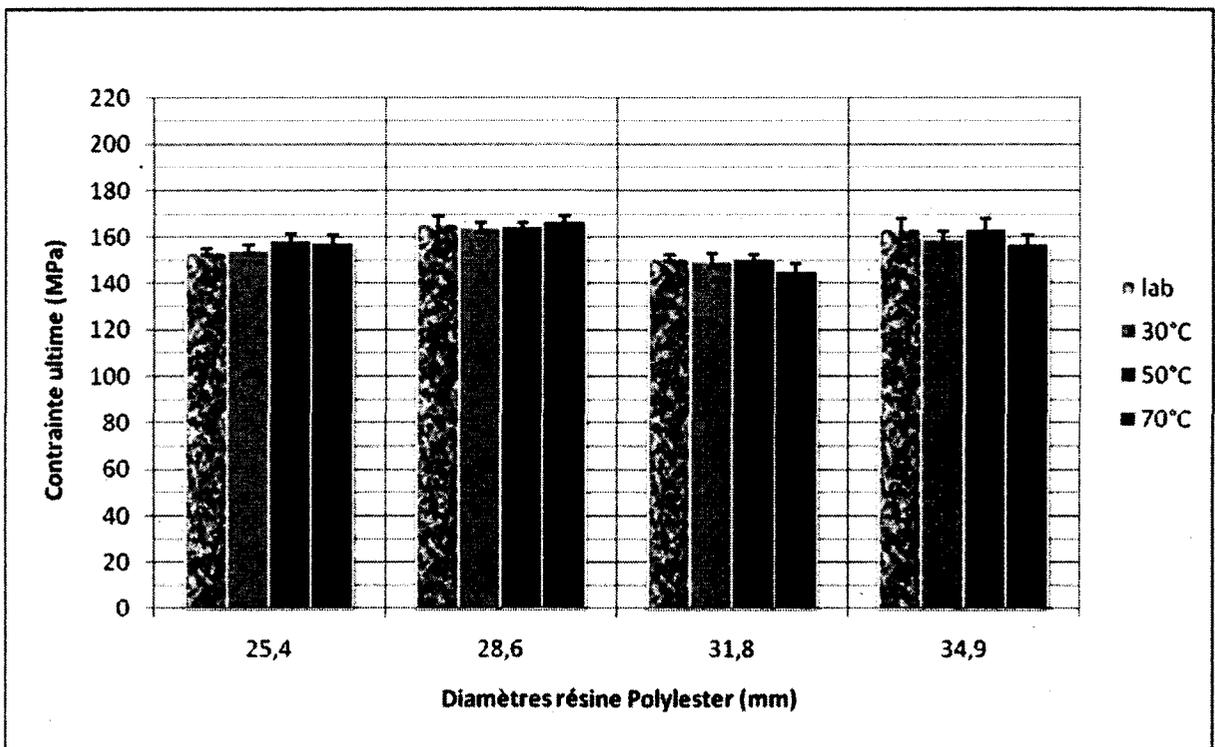


Figure 3.12 : Résistance au cisaillement direct à différentes températures (résine polyester)

Aucun changement significatif de la résistance en cisaillement des goujons de résine polyester ou vinylester n'a été constaté après conditionnement à des températures 23, 30, 50 et 70°C.

3.2.1.2 Essai de Flexion par 4 points

Les résultats initiaux de résistance à la flexion par 4 points sont présentés au tableau 3.4 :

Tableau 3.4 : Essai de flexion par 4 points à température ambiante

résine	d (mm)	A (mm ²)	Tu (Mpa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	E (GPa)	Ecart type (GPa)	Ecart type (%)	microdef	Ecart type	Ecart type (%)
vinylester	25,4	506,71	1 324,31	62,45	4,72	54,08	0,66	1,22	0,024	0,001	4,22
	28,6	642,42	1 213,24	62,69	5,17	53,39	1,53	2,86	0,023	0,001	5,33
	31,8	794,23	1 165,20	36,75	3,15	52,60	0,66	1,26	0,022	0,001	4,08
	34,9	956,62	1 210,19	50,37	4,16	50,31	0,54	1,08	0,024	0,001	4,18
	38,1	1 140,09	1 077,01	61,01	5,66	51,63	0,78	1,50	0,021	0,001	4,97
	41,3	1 339,65	1 015,31	22,29	2,20	50,20	1,01	2,02	0,020	0,001	3,37
	44,5	1 555,28	1 040,29	32,19	3,09	49,28	0,73	1,48	0,021	0,001	3,73
polyester	25,4	506,71	1 080,91	71,63	6,63	51,06	1,52	2,98	0,021	0,001	5,93
	28,6	642,42	787,68	48,82	6,20	50,21	1,09	2,17	0,016	0,001	6,04
	31,8	794,23	839,31	33,04	3,94	51,60	1,04	2,02	0,016	0,001	4,67
	34,9	956,62	758,67	36,41	4,80	49,45	0,75	1,52	0,015	0,001	4,20

Les résultats obtenus montrent que les contraintes ultimes à la flexion par 4 points sont comprises :

- entre 1 000 et 1325 MPa pour les goujons manufacturés avec une résine vinylester ;
- entre 750 et 1100 MPa pour les goujons manufacturés avec une résine polyester.

Il y a un léger effet de diamètre. En effet les plus petits diamètres pour chaque espacements d'appuis (25,4 mm pour l=600 mm et 38,1 mm pour l=900 mm) présentent une résistance légèrement supérieure. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation du rapport entre la surface transversale et la surface longitudinale lorsque le diamètre augmente pour un même espacement d'appuis.

Les goujons manufacturés avec une résine polyester présentent une résistance de 20 à 40% inférieure à ceux en vinylester caractérisant une moins bonne performance de l'interface fibres/résine. Par exemple pour un goujon de diamètre 34,9 mm, le spécimen manufacturé en résine vinylester présente une résistance en flexion de 1 210 MPa, alors que le polyester présente une résistance de 759 MPa soit une résistance inférieure de 37%.

Le comportement des goujons reste élastique jusqu'à la rupture.

Les modules d'élasticité en flexion varient :

- de 50 à 54 GPa pour les goujons manufacturés avec une résine vinylester ;
- de 49 à 51 GPa pour les goujons manufacturés avec une résine polyester.

Les microdéformations des fibres restent inférieures à 3%.

Tous les spécimens évalués ont présenté une rupture soit par tension des fibres inférieures (pour les plus petit diamètres), soit par compression des fibres supérieures, soit équilibrée comme présenté sur les Figures 3.13 à 3.15 :

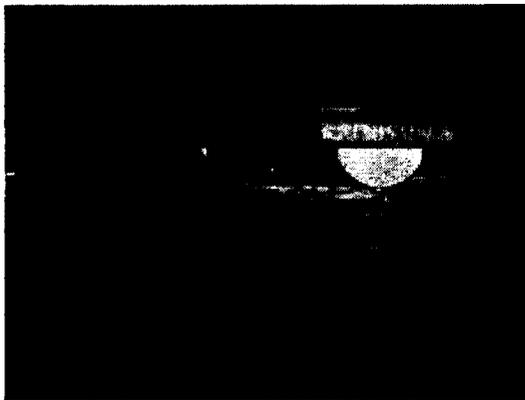


a)

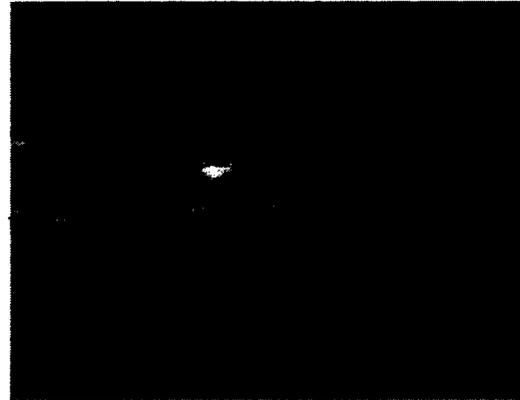


b)

Figures 3.13 : Rupture en flexion par compression des goujons de PRFV (plus gros diamètres)

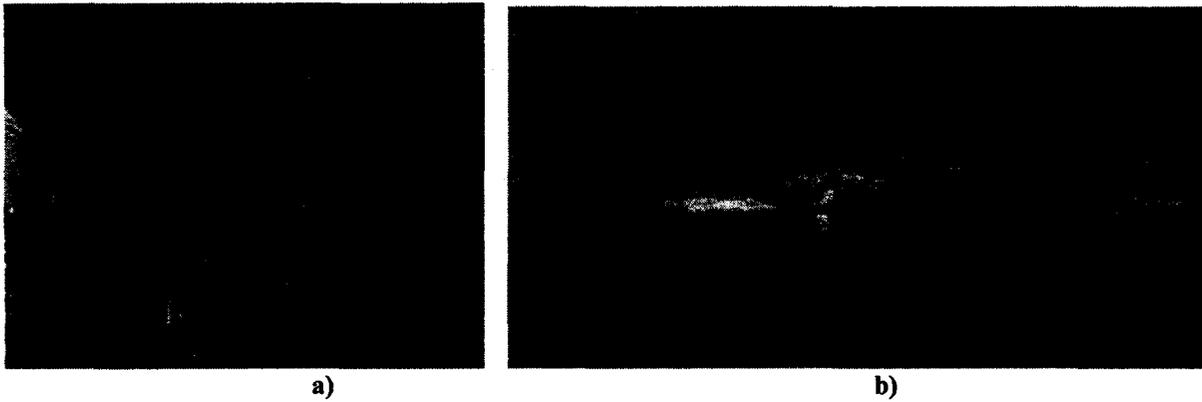


a)



b)

Figures 3.14 : Rupture en flexion par tension des goujons de PRFV (plus petits diamètres)



Figures 3.15 : Rupture en flexion équilibrée des goujons de PRFV (tension et compression)

Les différents types de rupture correspondent à l'effet du diamètre mentionné précédemment. Ainsi pour un espacement d'appui choisi, les plus gros diamètres présentent plutôt une rupture par compression des fibres supérieures et les plus petits une rupture par tension des fibres inférieures.

Les Figures 3.16 et 3.17 présentent la variation des contraintes ultimes à la flexion par 4 points en fonction de la température de conditionnement. Les goujons sont conditionnés pendant 72 heures à différentes températures et caractérisés immédiatement, conservant la température de conditionnement :

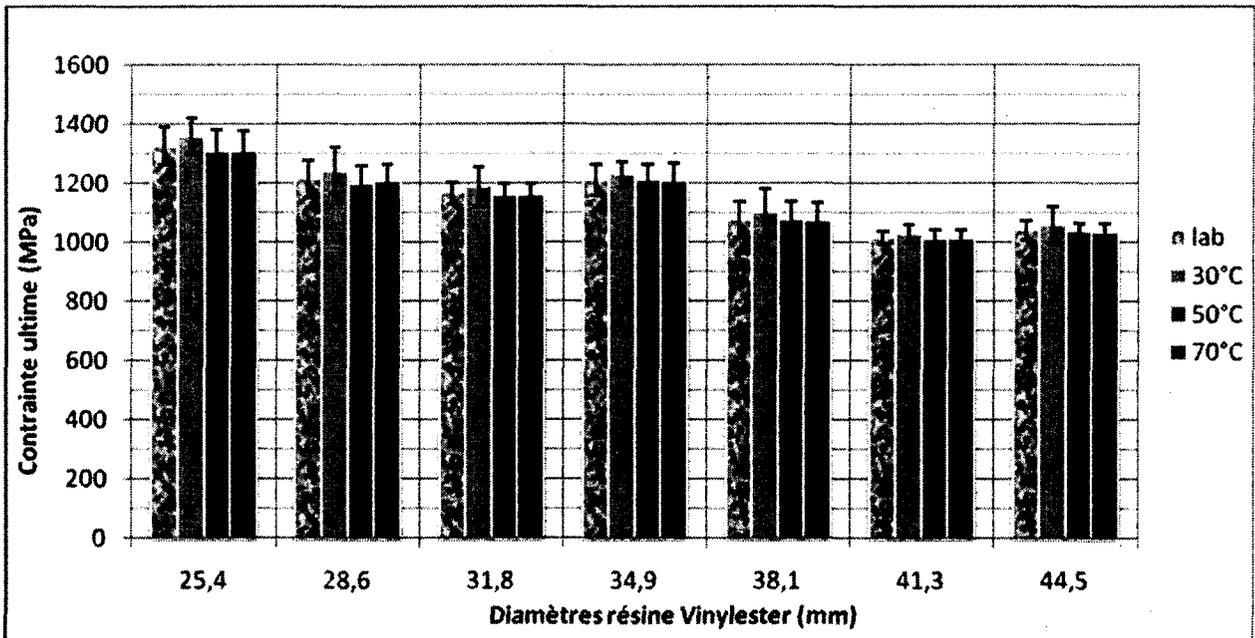


Figure 3.16 : Résistance à la flexion par 4 points à différentes températures (résine vinylester)

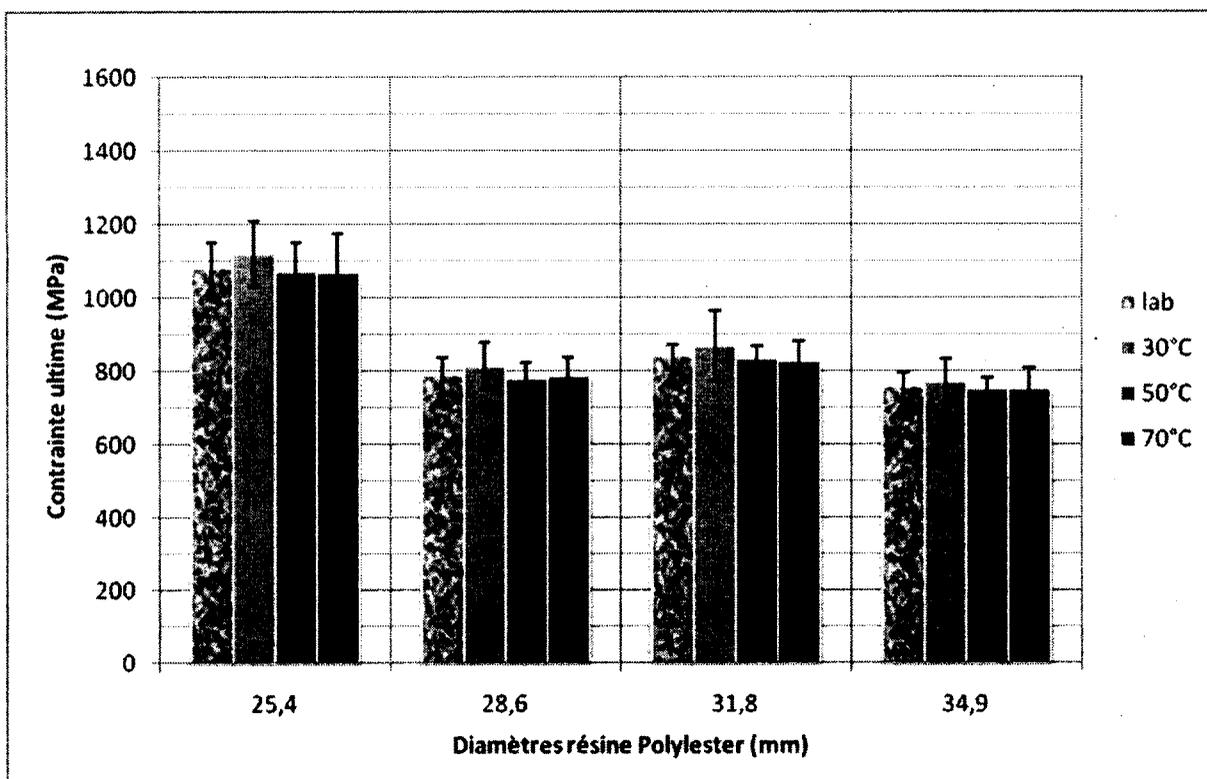


Figure 3.17 : Résistance à la flexion par 4 points à différentes températures (résine polyester)

Aucune variation significative de la résistance en flexion des goujons de résine polyester ou vinylester n'a été constaté après conditionnement à des températures 23, 30, 50 et 70°C.

3.2.1.3 Essai de Cisaillement Interlaminaire (*Short Beam Test*)

Les résultats initiaux de résistance au cisaillement interlaminaire sont présentés sur le tableau et figures suivantes :

Tableau 3.5 : Résistance au cisaillement interlaminaire à température ambiante

résine	<i>d</i> (mm)	<i>A</i> (mm²)	Tu (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)
vinylester	25,4	506,71	53,24	2,30	4,31
	28,6	642,42	59,91	2,01	3,36
	31,8	794,23	60,14	2,42	4,03
	34,9	956,62	61,09	1,17	1,28
	38,1	1 140,09	53,97	1,54	2,85
	41,3	1 339,65	58,33	1,48	2,54
	44,5	1 555,28	60,20	1,25	2,07
polyester	25,4	506,71	39,07	0,70	1,79
	28,6	642,42	34,76	1,28	3,68
	31,8	794,23	40,14	1,74	4,33
	34,9	956,62	36,67	1,18	4,94

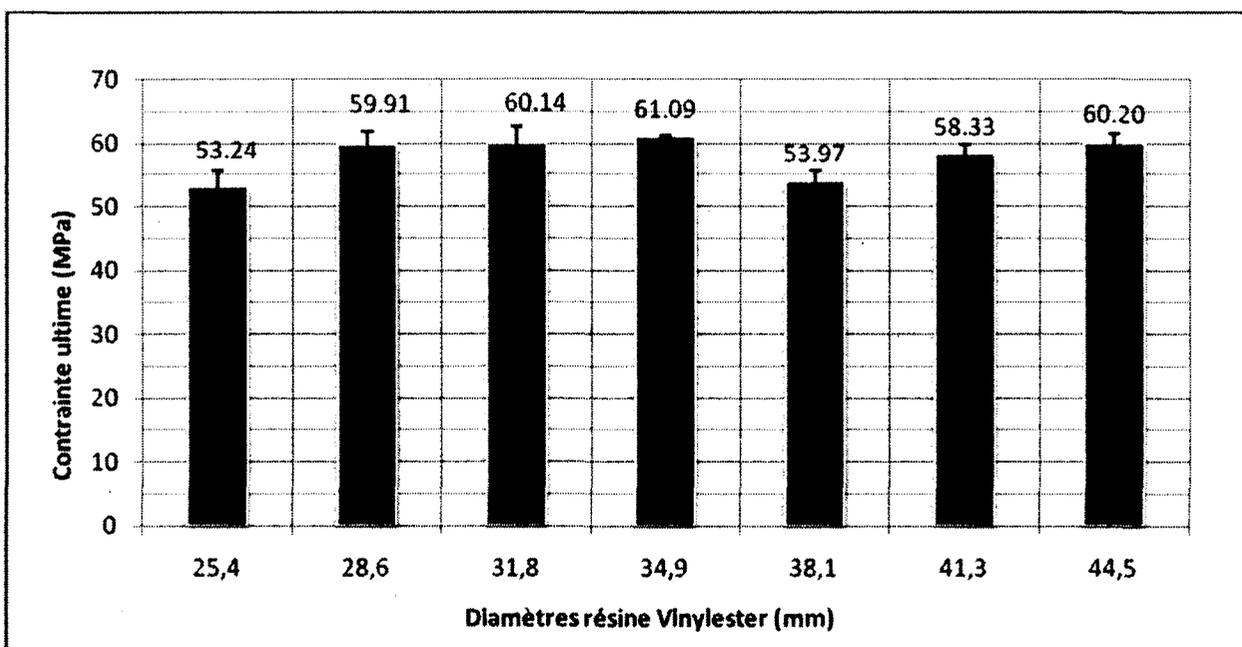


Figure 3.18 : Résistance au cisaillement interlaminaire à température ambiante (résine vinylester)

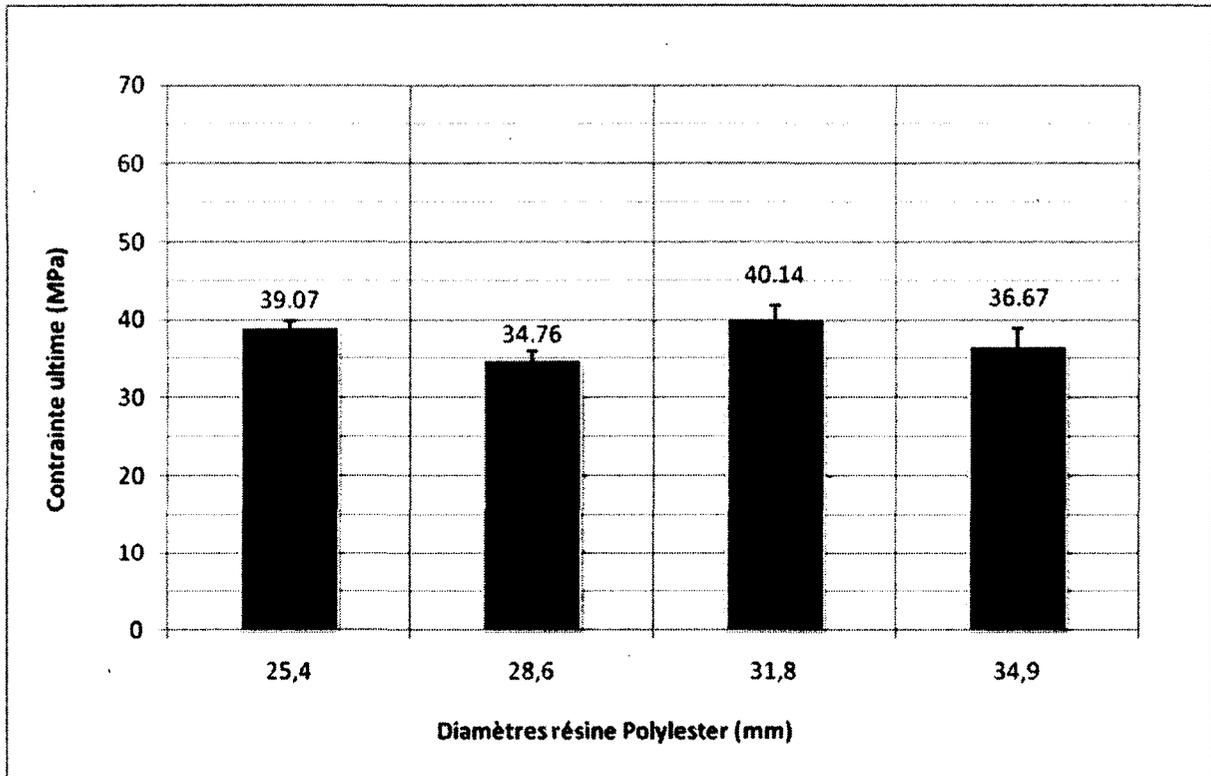
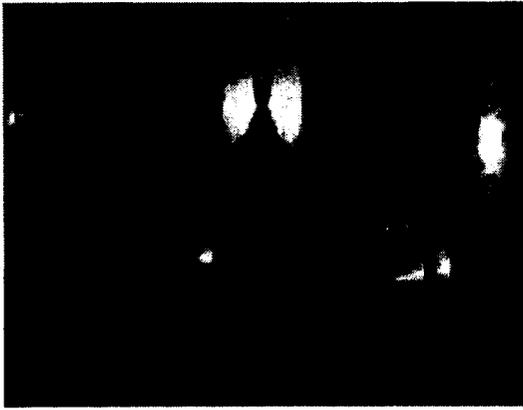


Figure 3.19 : Résistance au cisaillement interlaminaire à température ambiante (résine vinylester)

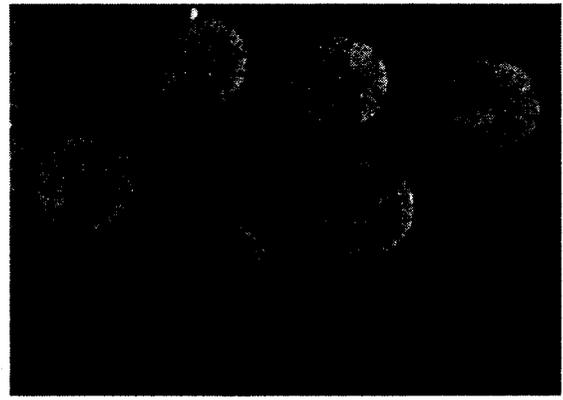
Les résultats montrent que les contraintes ultimes au cisaillement interlaminaire sont comprises :

- entre 53 et 61 MPa pour les goujons manufacturés avec une résine vinylester
- entre 34 et 40 MPa pour les goujons manufacturés avec une résine polyester

Comme pour la flexion, la différence de résultats entre la résine polyester et vinylester caractérise la performance moindre de l'interface fibres/résine polyester (25 à 40% inférieure). Le comportement des goujons reste élastique jusqu'à la rupture. Tous les spécimens étudiés ont présenté une rupture parfaite par cisaillement interlaminaire comme présenté sur les figures 3.20 et 3.21 :

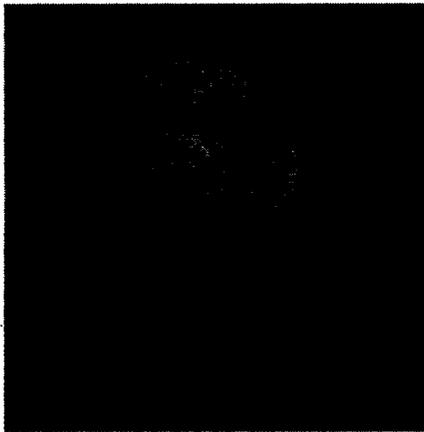


a)

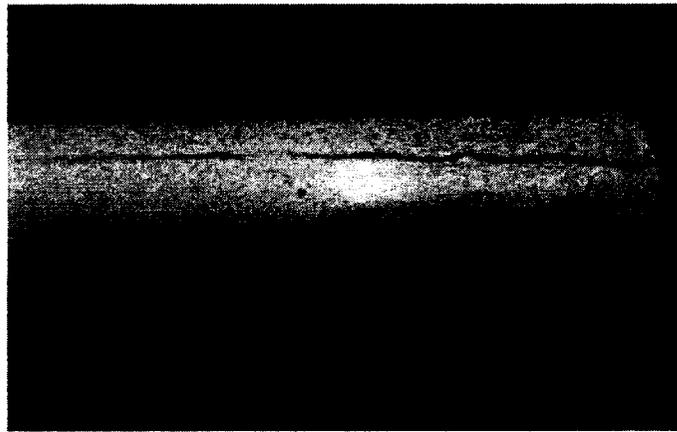


b)

Figures 3.20 : Rupture en cisaillement interlaminaire de goujons de PRFV vinylester



a)



b)

Figures 3.21 : Rupture en cisaillement interlaminaire de goujons de PRFV polyester

3.2.2 Propriétés physiques

Les propriétés physiques des goujons testés sont présentées au tableau 3.6 :

Tableau 3.6 : Propriétés physiques des goujons de PRFV

résine	<i>d</i> (mm)	Taux de fibres (%)	Absorption W (%)	Cure P (%)	Tg (°C)	CET L (10 ⁻⁶ .°C ⁻¹)	CET T (10 ⁻⁶ .°C ⁻¹)	Densité β
vinylester	25,4	81,50±0,061	0,07±0,014	100	118±1	7,5±0,35	25,4±0,35	2,28±0,02
	28,6	81,33±0,084	0,08±0,009	100	119±1,5	7,6±0,45	25,9±0,65	2,22±0,02
	31,8	80,47±0,101	0,05±0,009	100	124±2	7,7±0,65	27,1±0,75	2,14±0,03
	34,9	80,70±0,384	0,06±0,003	100	124±1	7±0,40	23,5±0,45	2,12±0,03
	38,1	80,63±0,029	0,07±0,009	100	123±1,5	7,6±0,32	24±0,38	2,14±0,02
	41,3	80,91±0,007	0,07±0,011	100	121±3	7,6±0,15	27,6±0,25	2,12±0,03
	44,5	80,25±0,015	0,07±0,014	100	125±1	7,8±0,75	26,6±0,85	2,08±0,02
polyester	25,4	80,63±1,32	1,46±0,025	99,84	87±2,5	7,8±1	23,2±0,95	2,18±0,03
	28,6	80,64±0,065	1,59±0,059	99,91	83±3	6,9±0,15	23,9±0,55	2,20±0,02
	31,8	79,55±0,115	1,50±0,043	99,95	84±1,5	7,6±1,1	26,5±1,05	2,13±0,01
	34,9	79,79±0,02	1,53±0,016	99,98	90±4	6,8±0,12	21±0,45	2,11±0,02

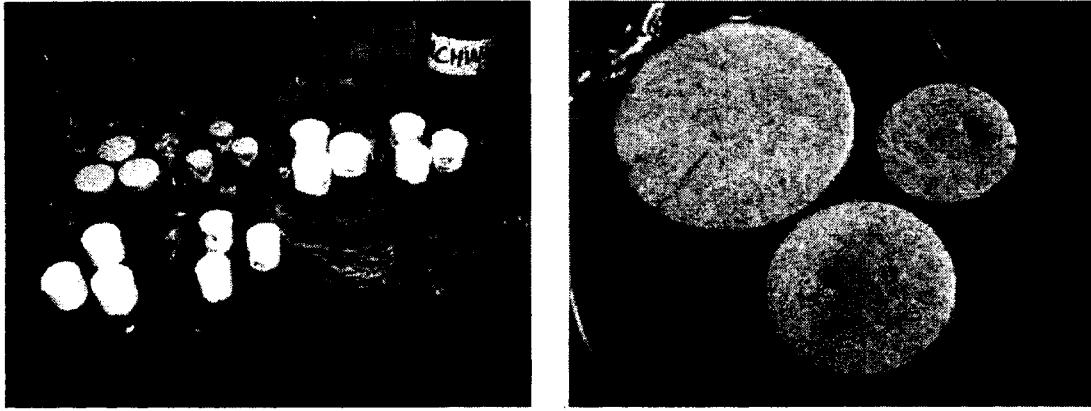
- **Taux de fibres** : Quelque soit le type de goujon, les résultats obtenus sont de l'ordre de 80% de taux de fibres massique ce qui satisfait à l'exigence de 70% du document CSA S-807 ;
- **Taux d'absorption d'eau** : Les résultats obtenus pour la résine vinylester satisfont amplement aux recommandations (<<0.75% CSA S-807 classification D1 haute durabilité). Par contre la résine polyester ne satisfait pas à la recommandation de <1% pour une classification D2 (durabilité modérée et résines polyester), d'où l'intérêt de caractériser la durabilité des goujons manufacturés avec cette résine ;
- **Taux de cure** : Une proportion négligeable de résine polyester reste non polymérisée à la sortie de l'usine (de 0,02 à 0,16%), cependant les résultats sont nettement supérieurs aux exigences de 95% pour une classification D1 ;

- **Température de transition vitreuse** : Les résultats obtenus permettent de répondre aux exigences de classification D1 haute durabilité pour la résine vinylester ($>>100^{\circ}\text{C}$), et D2 durabilité modéré pour la résine polyester ($>80^{\circ}\text{C}$) ;
- **Coefficients d'expansion thermique** : La seule recommandation concernant le coefficient d'expansion thermique transversal ($<40 \times 10^6$) est satisfaite. De plus, le faible module d'élasticité transversale des goujons assure un confinement par le béton et évite les problèmes dus à la valeur plus élevée du coefficient de dilatation dans ce sens ;
- **Densité apparente** : La densité des produits ne varie pas selon le type de goujon (résine) et diminue sensiblement avec l'augmentation du diamètre du goujon.

Le tableau et figures suivantes présentent les résultats obtenus à l'essai de pénétration :

Tableau 3.7 : Nombres de points par capillarité observés

Pénétration			
Résine	<i>d (mm)</i>	n	Ecart type
vinylester	25,4	1,67	1
	28,6	0	0
	31,8	0,33	0,5
	34,9	0,67	1
	38,1	0	0
	41,3	0,33	0,5
	44,5	0,33	0,5
polyester	25,4	1	1
	28,6	0	0
	31,8	0	0
	34,9	0,33	0,5



Figures 3.22 : Essai de pénétration à la fuchsine

L'essai mené ne caractérise qu'une très faible connectivité des pores et aucune différence majeure selon le type de résine malgré les différences des taux d'absorption observées. Les pores plus nombreux de la résine polyester ne semblent donc que faiblement connectés.

3.3 Phase II : Études de durabilité sur les goujons de PRFV

Lors de la mise à disposition sur le marché de nouveaux produits, le milieu du génie civil a été longtemps considéré comme réservé. Cependant, face au développement de nouveaux produits performants, l'industrie de la construction a dû modifier son approche conservatrice, ce qui a permis aux nouvelles technologies liées à l'utilisation des composites de PRF de susciter une attention toute particulière de la part des ingénieurs et des gestionnaires d'infrastructures. La méfiance des autorités est fondée en partie sur le manque d'informations sur le comportement à long terme de ces matériaux dans les conditions de service les plus critiques. Un des grands défis actuels à relever quant à l'acceptation des composites de PRF en génie civil concernant leur durabilité durant la période de service.

3.3.1 Essais de gel/dégel

- Objectif

Dès essais de cycles de gel/dégel ont été réalisés sur des goujons de diamètre 25,4 mm et de longueur 300 mm pour les 2 types de résines. Les essais ont été réalisés selon la norme ASTM C 666M – 03 « *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing* ». L'objectif des essais est de caractériser la résistance résiduelle des goujons aux cisaillements direct et interlaminaire après exposition à 300 cycles de gel/dégel. Les goujons étant des produits solides, ces essais permettent également de caractériser l'influence de l'absorption d'eau sur la résistance des fibres et de l'interface au gel/dégel.

- Procédure

Cette norme destinée à caractériser la résistance de prismes de béton a été modifiée pour les goujons de PRFV. Des goujons de 25,4 mm de diamètre de chaque type de résine sont évalués, permettant de réaliser des échantillons suffisamment enrobés de béton (1 diamètre d'enrobage) en respectant les dimensions imposées par la norme (75 mm de diamètre).

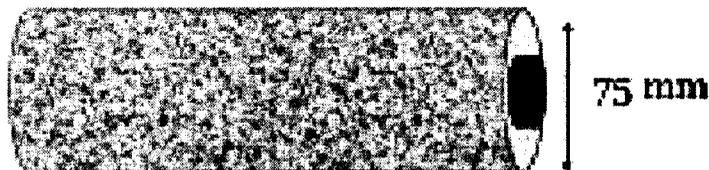


Figure 3.23 : Spécimen de goujon enrobé de béton pour essai de gel/dégel

- Un premier lot de 5 goujons de vinylester et polyester est testé au gel/dégel sans aucun conditionnement (figure 3.24) ;



Figure 3.24 : Spécimens non conditionnés de 25,4 mm de diamètre

- Un deuxième lot de 5 goujons de vinylester et polyester est testé en immersion aqueuse (entourés de 1 à 3 mm d'eau). Cette procédure permet de caractériser la résistance direct au gel/dégel des goujons et de caractériser l'influence du taux d'absorption plus élevé des goujons polyester (figure 3.25) ;



Figure 3.25 : Spécimens à saturation dans l'eau de 25,4 mm de diamètre

- Un dernier lot de 5 goujons de vinylester et polyester est étudié en immersion aqueuse, enrobés de mortier (éprouvette cylindrique de 75 mm de diamètre, mortier E/C=0,40 G/S=3). Cette dernière procédure permet de simuler de manière plus représentative l'effet des cycles de gel/dégel sur des goujons internes au béton. Une extrémité des

goujons est laissée volontairement non enrobée pour simuler la présence d'un joint de chaussée par lequel les eaux s'infiltrent dans la structure (figure 3.26).

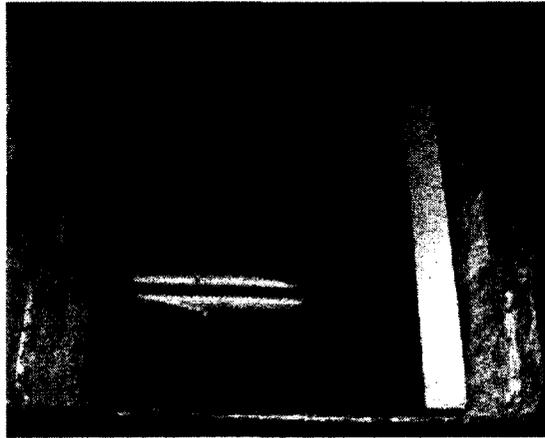


Figure 3.26 : Spécimens enrobés de béton à saturation dans l'eau

Un cycle complet s'effectue de manière à ce que la température interne au centre des spécimens passe de 4°C à -18°C puis revienne à 4°C en 4 heures de temps. Six cycles par jour sont ainsi réalisés soit une durée totale d'essai de 50 jours. Les différents spécimens sont placés dans des bacs en PVC relativement flexibles dans une chambre environnementale. L'emploi de contenants déformables permet de ne pas sur-dégrader les spécimens lors du gel de l'eau. Un thermocouple placé dans un échantillon permet de calibrer la chambre. Afin d'obtenir une température interne aux échantillons de 4°C à -18°C puis un retour à 4°C en 4 heures, la température de la chambre descend linéairement à -20°C puis remonte à 6°C en 4 heures. Les températures internes aux échantillons n'excèdent jamais -19°C en phase de gel et 6°C en phase de dégel et le différentiel entre le centre et l'extérieur d'un échantillon ne dépasse pas 28°C, comme préconisé par la norme. Trois échantillons de chaque type de goujon sont testés aux cisaillements direct et interlaminaire après 300 cycles de gel/dégel.

Des observations microscopiques sont réalisées pour évaluer les éventuelles dégradations survenues à l'interface goujon/béton.

3.3.2 Résistance chimique

- Objectif

Dés essais de résistance chimique ont été réalisés afin de caractériser la résistance des goujons aux agressions environnementales en service. Cette partie ne comporte pas de facteur accélérant (température) et consiste en l'immersion de goujons à température ambiante dans différentes solutions fortement concentrées, plus dégradantes que les conditions réelles afin d'assurer la résistance aux agressions chimiques des goujons de PRFV.

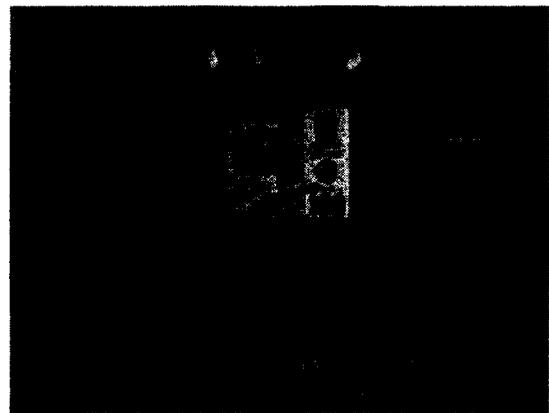
- Procédure

Pour chaque diamètre et type de résine, six spécimens d'une longueur de 304,8 mm (12 po) sont immergés dans des bacs en PVC fermés et étanchés durant trois mois à température du laboratoire (23°C) dans les solutions suivantes :

- eau d'aqueduc, servant de témoin avec un pH de 7,40 ;
- solution aqueuse à 3% massique de CaCl_2 avec un pH de 7,65, simulant des conditions d'intense utilisation de sels de déglçage plus agressifs que NaCl ;
- solution aqueuse à 3% massique de NaOH avec un pH de 13,75, permettant de caractériser la résistance des goujons en milieu extrêmement basique, à forte concentration d'ions hydroxydes ;
- solution saturée en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec un pH de 12,65, simulant l'eau des pores internes du béton à pH élevé (12 à 13), saturée en ions calcium (eau de chaux).



a)



b)

Figures 3.27 : Goujons de PRFV conditionnés en solution chimique

Les goujons sont maintenus écartés horizontalement et verticalement de 6,35 mm (0.25 po) à l'aide de tige de PVC pour garantir une immersion totale, comme recommandé dans les normes traitant d'essais similaires (ASTM C 581-03, ACI 440.3R-04, DBT-2).

Des essais mécaniques résiduels au cisaillement interlaminaire sont effectués afin de caractériser les dégradations chimiques au niveau de la zone d'interface (perte d'adhésion, décollement, dégradation des fibres,...).

Les propriétés suivantes sont déterminées après la période d'immersion :

- Contrainte résiduelle au cisaillement interlaminaire ;
- Module d'élasticité en flexion ;
- Taux d'absorption d'eau des goujons ;
- Tg ;
- Variation massique ;
- Variation dimensionnelle.

Des observations microscopiques optique et à balayage (SEM) sont réalisées pour observer les faciès de rupture et les dégradations survenues.

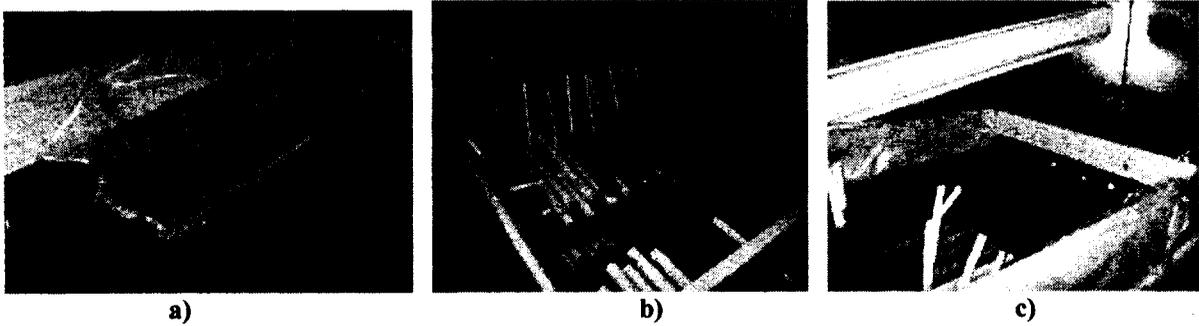
3.3.3 Essais de vieillissement accéléré

- Objectif

Des essais de vieillissement accéléré ont été réalisés selon la méthode DBT-2 « *Recommended FRP Dowel Bar Test Protocol* » proposée par Market Development Alliance du Composite Institute [DBT-2, 1998] conformément à la norme ASTM C 581 – 03 « *Determining Chemical Resistance of Thermosetting Resins Used in Glass-Fiber-Reinforced Structures Intended for Liquid Service* ». Cette méthode empirique, élaborer et valider sur le terrain, permet de caractériser les propriétés à long terme de goujons utilisés pour le transfert de charge aux joints de chaussées. L'objectif est de caractériser la durabilité des goujons de PRFV et de prédire les propriétés à long terme au delà de la période de service, garantissant un entretien minimal durant la période de design de 30 ans. Comme les autres méthodes de vieillissement accéléré, elle se base sur les théories d'Arrhenius liant le phénomène cinétique de dégradation au facteur de température, mais est plus représentative des conditions réelles par le choix d'une solution de ciment. Cette méthode assume que les 2 principaux modes de fonctionnement en service des goujons sont le cisaillement et la flexion.

- Procédure

Les échantillons sont immergés en solution d'extrait de ciment à différentes températures. La solution doit être représentative du pH et des composants de l'eau interne aux pores du béton. Le but est d'obtenir une solution avec un pH de l'ordre de 12,60 (pH typique de l'eau interne au béton) et saturée en CaO. Elle est obtenue en mélangeant du ciment Portland type 30 (HE) avec de l'eau d'aqueduc avec une concentration de ciment > 2 g/l. Le pH est ensuite mesuré et est maintenu constant tout au long de la période par ajustement avec du Ca(OH)₂. Des échantillons destinés à être caractérisés au cisaillement direct et à la flexion sont immergés en solution pour 30, 60 et 180 jours à différentes températures (23°C, 50°C et 60°C). Des containers en bois étanchés par un film de polyéthylène haute densité ont été réalisés pour contenir les goujons dans de petites chambres environnementales (figures 3.28). Les goujons ont été maintenus écartés horizontalement et verticalement de 6,35 mm (0.25 po) à l'aide de tige de PVC pour garantir une immersion totale et un vieillissement à l'état de saturation.



Figures 3.28 : Containers de vieillissement accéléré en chambre environnementale

La température maximale de 60°C a été choisie pour éviter les sur-dégradations et ne pas fausser les prévisions comme expliqué à la section 2.3.5 *Limites*.

Pour tenir compte de la variation des propriétés initiales des matériaux à différentes températures dans les prédictions, les propriétés initiales sont déterminées aux mêmes températures que celles utilisées pour les vieillissements soit 23°C, 50°C et 60°C.

Pour chaque diamètre et type de résine, quatre spécimens (trois recommandés par la méthode) sont étudiés pour chaque période et température d'immersion. Les propriétés résiduelles permettent d'établir les courbes de vieillissement d'Arrhenius et les taux de dégradation des matériaux, et ainsi prédire leurs propriétés à long terme.

Les propriétés suivantes sont après vieillissement :

- Contrainte résiduelle de cisaillement direct ;
- Contrainte résiduelle de flexion ;
- Module d'élasticité ;
- Absorption d'eau des goujons ;
- Tg ;
- Variation massique ;
- Variation dimensionnelle.

Des observations microscopiques optique et à balayage (SEM) sont réalisées pour observer les faciès de rupture et les dégradations survenues.

Pour le traitement statistique des résultats, l'écart type, l'écart type de la moyenne et la comparaison pour chaque lot étudié après conditionnement sont calculés comme suit :

L'écart type pour chaque lot testé est calculé en accord avec les normes des essais mécaniques réalisés, avec l'équation suivante :

$$s = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)}{(n-1)}} \quad (3.13)$$

Avec s : écart type estimé

x_i : valeur du spécimen

\bar{x} : valeur moyenne déterminée sur n spécimens

n : nombre de spécimens étudiés

L'écart type de la moyenne pour chaque lot caractérisé est calculé avec l'équation suivante (pour les tableaux de résultats globaux présentés en annexe) :

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.14)$$

Avec σ_m : écart type de la moyenne du lot

σ : écart type estimé du lot comme calculé précédemment (s)

n : nombre de spécimens étudiés pour le lot considéré

Enfin, lorsque les résultats après conditionnement présentent une forte similarité avec les résultats initiaux de référence, une comparaison de la variabilité statistique est établie au moyen de t -test comme suit :

- Premièrement, t est déterminé à l'aide de l'équation suivante :

$$t = \frac{x_{m1} - x_{m2}}{\left[\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2} \right]^{1/2}} \quad (3.15)$$

Avec x_m : valeur moyenne du lot considéré

σ : écart type estimé du lot comme calculé précédemment (s)

n : nombre de spécimens étudiés pour le lot considéré

- Ensuite, le degré de liberté ν pour les deux lots considérés est estimé comme suit :

$$\nu = \frac{\left[\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2} \right]^2}{\frac{\left(\frac{\sigma_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{\sigma_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 - 1}} \quad (3.16)$$

- Avec le degré de liberté estimé, on extrapole une valeur de t dans la table ci-dessous avec un niveau de probabilité choisi. Si $t_{calculé} < t_{choisi}$ dans la table, alors les deux lots comparés peuvent être considérés comme statistiquement similaires (au degré d'importance choisi pour t table).

Tableau 3.8 : Valeurs du paramètre t

Degree of freedom ν	t_{90}	t_{95}	t_{99}	$t_{99.5}$	$t_{99.9}$	$t_{99.95}$	$t_{99.99}$
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405
8	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
120	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373
∞	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

3.4 Résultats et analyse Phase II

Cette section présente les résultats finaux et synthétiques permettant de discuter la performance des goujons de PRFV dans les différentes conditions de service simulées. L'ensemble des résultats de la phase II est présenté en annexe.

3.4.1 Essais de gel/dégel

3.4.1.1 Résultats mécaniques et physiques

Les résultats aux cisaillements obtenus après 300 cycles de gel/dégel pour chaque type de goujons (résines) et conditionnements sont présentés aux figures 3.29 et 3.30 :

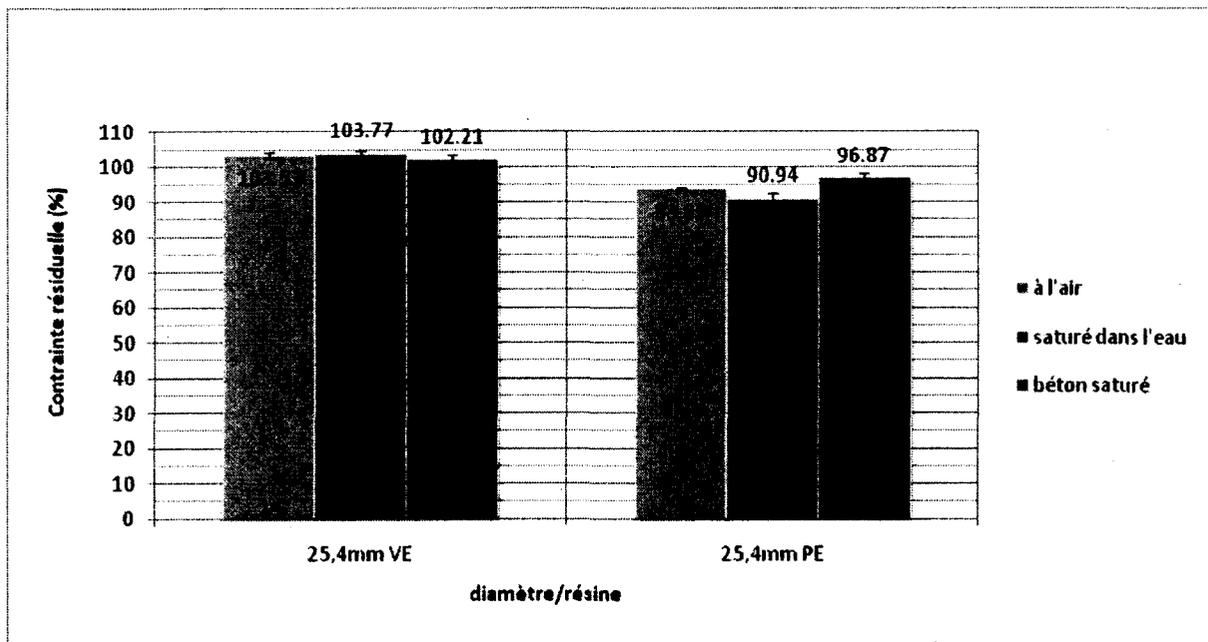


Figure 3.29 : Résistance au cisaillement direct de goujons 25,4 mm après 300 cycles de gel/dégel

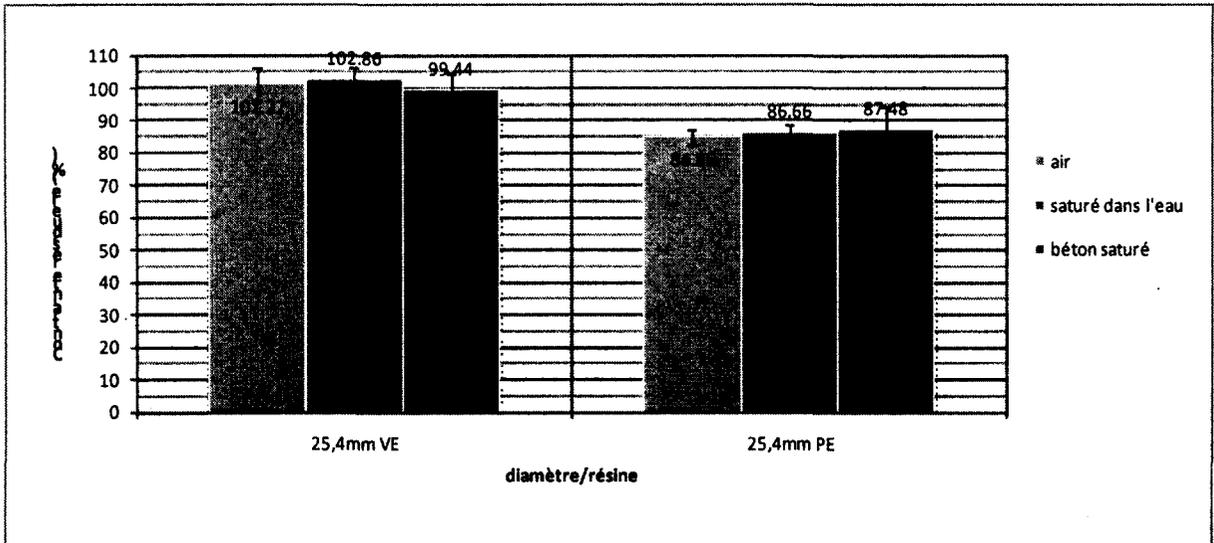


Figure 3.30 : Résistance au cisaillement interlaminaire de goujons 25,4 mm après 300 cycles de gel/dégel

- Les goujons en vinylester conserve une parfaite intégrité structurale après 300 cycles de gel/dégel. Aucune variation des propriétés physiques n'est observée ;
- Les goujons en polyester présentent des dégradations :
 - o Les contraintes résiduelles présentent une perte de l'ordre de 10 à 15% au cisaillement interlaminaire et de 5 à 10% au cisaillement direct, l'interface est donc la plus affectée par le gel ;
 - o Les goujons enrobés de béton sont les moins affectés (5 à 10% de perte) assurant une très bonne stabilité en condition de service, ceci probablement dû au confinement des goujons par le béton ;
 - o Les dégradations observées sur les goujons non conditionnés à l'air libre peuvent résulter de la différence entre les CET longitudinaux et transversaux. Les goujons subissent plus fortement les écarts thermiques de la chambre, les enrobés et saturés bénéficiant d'une certaine inertie, et ceci peut occasionner des contraintes internes de cisaillement dégradant l'interface.
- La stabilité des goujons en polyester demeure très satisfaisante ;
- Validation de l'intégrité des goujons en vinylester quelque soit le conditionnement par la méthode du *t-test* :

Tableau 3.9 : Résultats du t test pour les goujons VE 25,4 mm au cisaillement direct

Cisaillement direct VE 25,4 mm						
conditionnement	Tu réf (Mpa)	Tu final (Mpa)	t	v	t _{99,9} table	t<t table
<i>air</i>	167.49 ± 2.49	172.88 ± 0.07	3.70	24.84	3.72	<i>oui</i>
<i>saturé dans l'eau</i>		173.28 ± 2.65	3.56	12.60	4.22	<i>oui</i>
<i>béton saturé</i>		170.67 ± 2.31	2.09	15.35	4.07	<i>oui</i>

A partir de ce tableau et de la méthode expliquée page 77, on peut en conclure que les résultats demeurent identiques à un degré d'importance de 99,9% (t_{99,9} choisi).

- Validation de la dégradation des goujons en polyester la méthode du *t-test* :

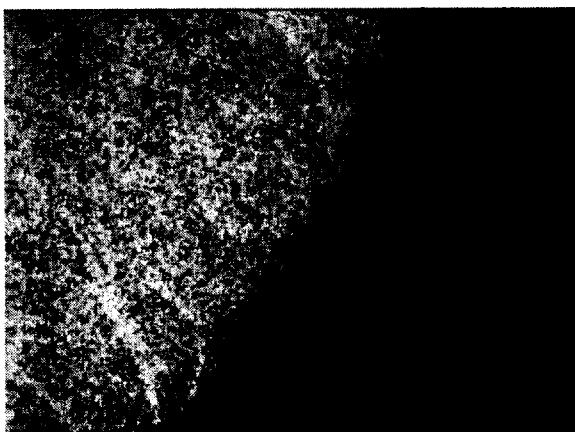
Tableau 3.10 : Résultats du t test pour les goujons PE 25,4 mm au cisaillement direct

Cisaillement direct PE 25,4 mm						
conditionnement	Tu réf (Mpa)	Tu final (Mpa)	t	v	t _{99,9} table	t<t table
<i>air</i>	153.58 ± 1.49	144.06 ± 1.17	11.24	5.74	5.96	<i>non</i>
<i>saturé dans l'eau</i>		139.20 ± 1.06	17.58	7.39	5.41	<i>non</i>
<i>béton saturé</i>		148.87.02 ± 2.01	4.21	17.48	3.97	<i>non</i>

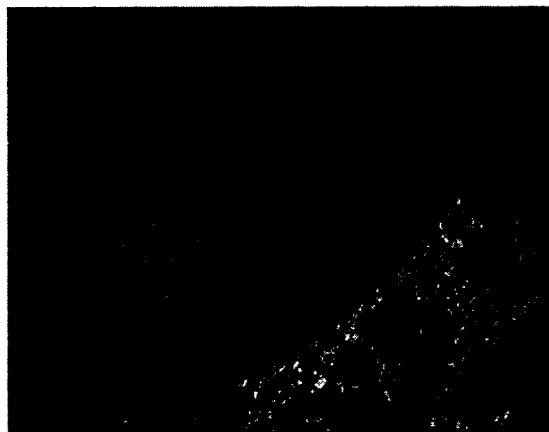
Etant donné que t<t table, il existe bien une variation entre les résultats ce qui confirme les baisses de résistance constatés sur la figure 3.29.

3.4.1.2 Analyse optique

L'interface goujon/béton a été observée par microscopie optique après 300 cycles de gel/dégel, les échantillons observés ont été prélevée au centre des éprouvettes. L'interface goujon/béton reste intacte après 300 cycles de gel/dégel comme montrer sur les figures 3.31 :



a)



b)

Figures 3.31 : microscopies optiques après 300 cycles de gel/dégel de goujons a) de polyester et b) de vinylester

3.4.2 Résistance chimique

3.4.2.1 Résultats mécaniques et physiques

Les résultats au cisaillement interlaminaire après une période d'immersion de 90 jours en solutions chimiques à 23°C sont présentés aux figures 3.32 et 3.33 :

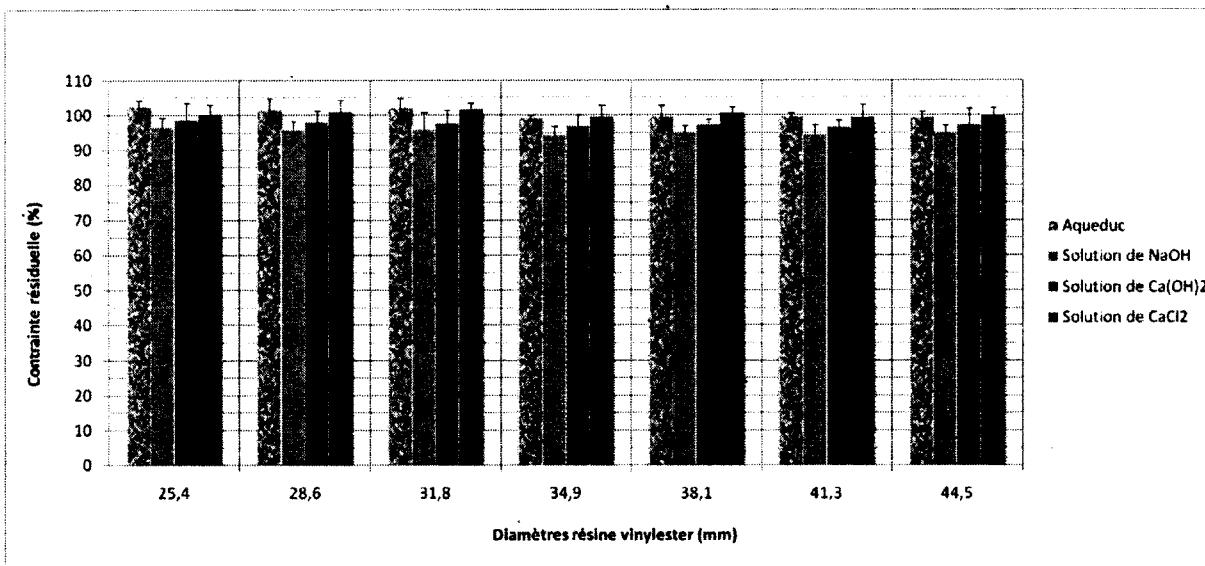


Figure 3.32 : Résistance au cisaillement interlaminaire après 90 jours de conditionnement dans différentes solutions (résine vinylester)

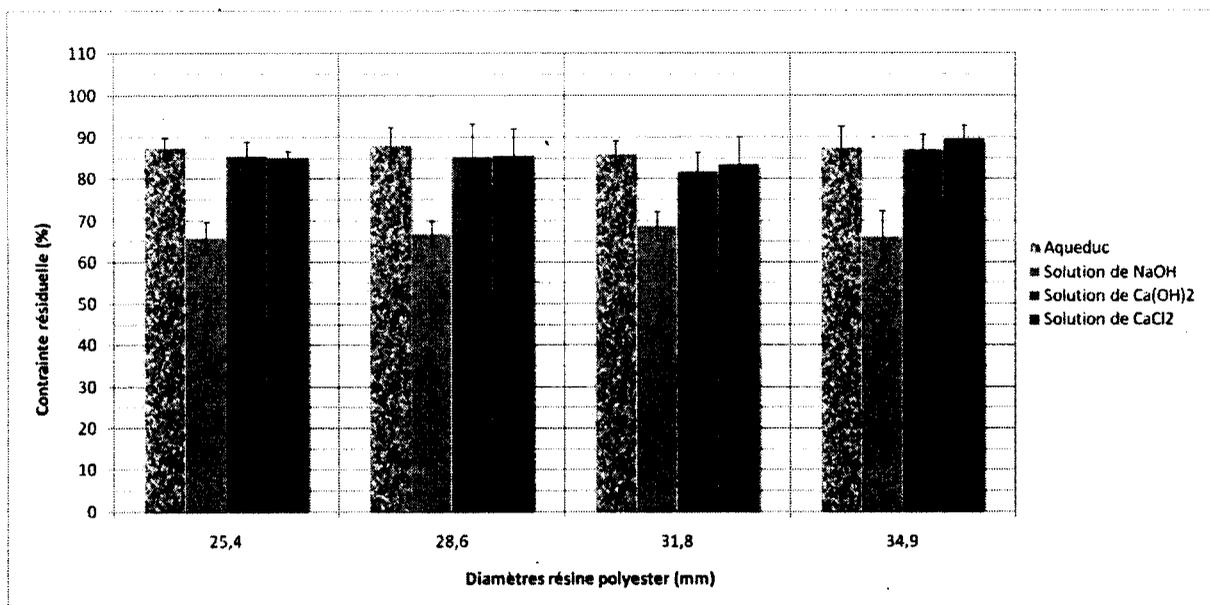
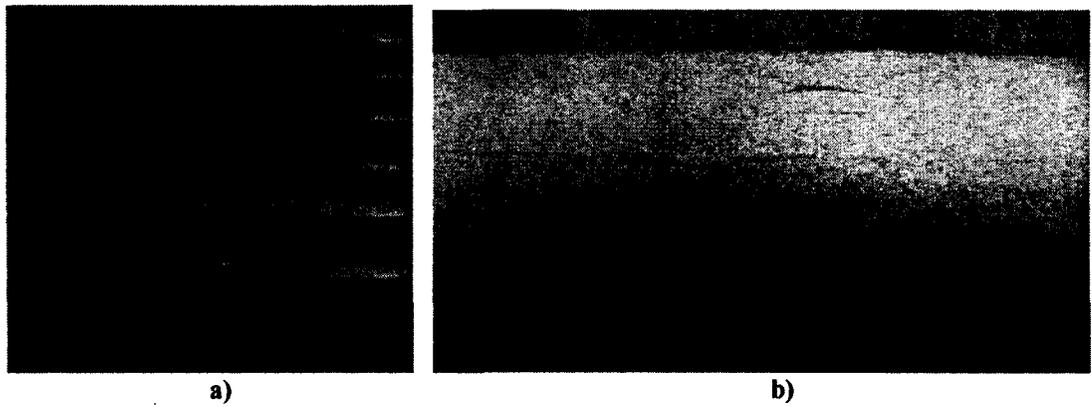


Figure 3.33 : Résistance au cisaillement interlaminaire après 90 jours de conditionnement dans différentes solutions (résine polyester)

Les variations suivantes ont été observées :

- Variation massique des spécimens négligeable (<0,20%) ;
- Perte de diamètre des spécimens négligeable (<0,10%) ;
- Les goujons en vinylester subissent une très faible dégradation de l'ordre de 5% des performances mécaniques après immersion dans la soude caustique (3% NaOH), et de l'ordre 2% en solution saturée en chaux (Ca(OH)₂). Les autres solutions (CaCl₂, H₂O) n'altèrent pas leurs performances mécaniques ;
- Les goujons en polyester présentent des dégradations pour toutes les solutions. Indépendamment du diamètre les contraintes résiduelles sont de l'ordre de 65% pour la soude caustique et 85% pour les autres solutions ;
- En solution à 3% de soude caustique, les goujons en polyester présentent une coloration verte de la résine et la surface devient plus poreuse comme montré sur les figures 3.34 :



Figures 3.34 : Aspect des goujons en polyester conditionnés 90 jours en solution de NaOH à 3%

L'intégrité des goujons en vinylester et les dégradations constatés sur les goujons en polyester sont confirmés par la méthode du *t test* comme présenté ci-dessous pour le diamètre 25,4 mm :

Tableau 3.11 : Résultats du *t test* pour les goujons VE 25,4 mm au cisaillement interlaminaire

Cisaillement interlaminaire VE 25,4 mm						
conditionnement	Tu réf (Mpa)	Tu final (Mpa)	t	v	t _{99,9} table	t < t table
<i>NaOH</i>	53.24 ± 2.30	51.47 ± 1.34	1.49	6.74	5.40	<i>oui</i>
<i>CaOH</i>		52.47 ± 2.57	0.50	16.36	4.02	<i>oui</i>
<i>CaCl2</i>		53.34 ± 1.46	0.08	7.32	5.41	<i>oui</i>

Tableau 3.12 : Résultats du *t test* pour les goujons PE 25,4 mm au cisaillement interlaminaire

Cisaillement interlaminaire PE 25,4 mm						
	Tu réf (Mpa)	Tu final (Mpa)	t	v	t _{99,9} table	t < t table
<i>NaOH</i>	39.07 ± 0.70	25.74 ± 0.98	24.75	7.00	5.41	<i>non</i>
<i>CaOH</i>						
<i>CaCl2</i>		33.45 ± 1.12	9.51	8.14	5.04	<i>non</i>
<i>béton saturé</i>		33.23 ± 0.53	14.87	4.56	7.90	<i>non</i>

Tableau 3.13 : Evolution de la Tg après conditionnement en solutions chimiques

Goujons	Tg ini (°C)	H ₂ O - CaCl ₂		Ca(OH) ₂		NaOH		
		Tg fin (°C)	% ini	Tg fin (°C)	% ini	Tg fin (°C)	% ini	
Vinylester	25,4 mm	118	118	100	117	99	115	97
	34,9 mm	124	124	100	123	99	121	98
	44,5 mm	125	125	100	124	99	121	97
Polyester	25,4 mm	87	88	101	86	99	80	92
	34,9 mm	90	89	99	88	98	81	90

Comme montré sur le tableau 3.13, seule la solution de soude affecte la Tg des goujons en polyester de l'ordre de 10%. La baisse des propriétés mécaniques observées dans les autres solutions n'est donc probablement due qu'à un phénomène de plastification de la matrice saturée, sans dégradation irréversible de la résine. Les valeurs données sont obtenus après 2 essais par DSC pour confirmer la Tg obtenue après conditionnement.

Le taux d'absorption d'eau à 50°C passe de 1,4 à 1,6% pour les goujons en polyester après exposition dans la solution de soude caustique. Cependant le taux de diffusion n'est pas affecté. Les goujons en vinylester ne présentent aucune variation après conditionnement comme présenté sur les figures 3.35 à 3.37 :

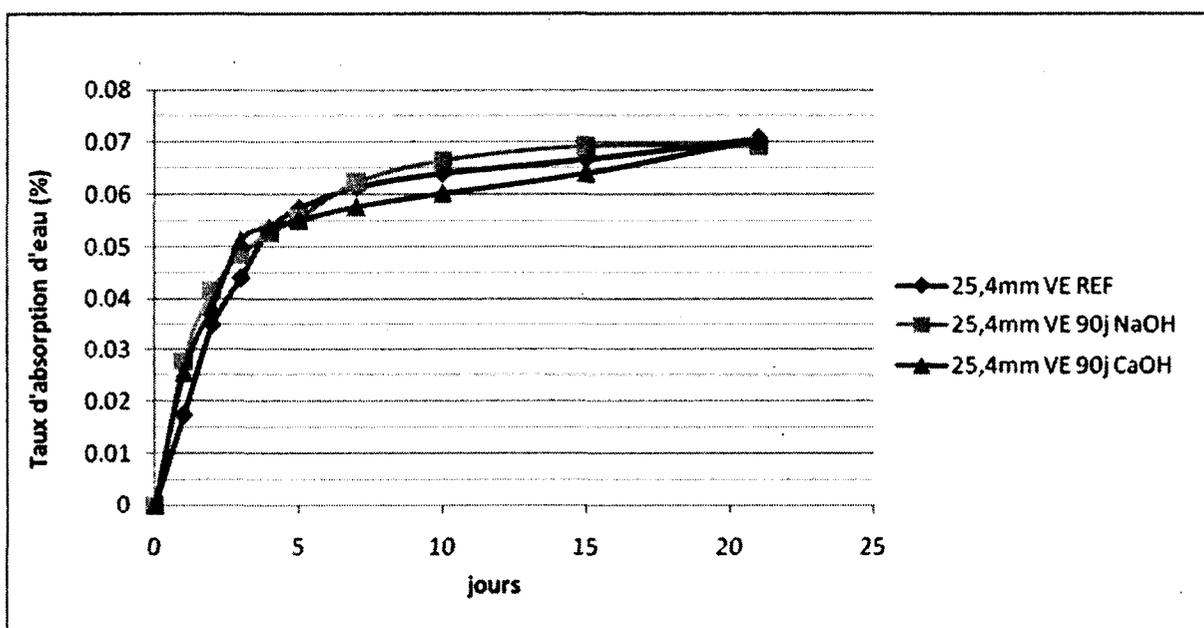


Figure 3.35 : Taux d'absorption d'eau à saturation des barres en résine vinylester

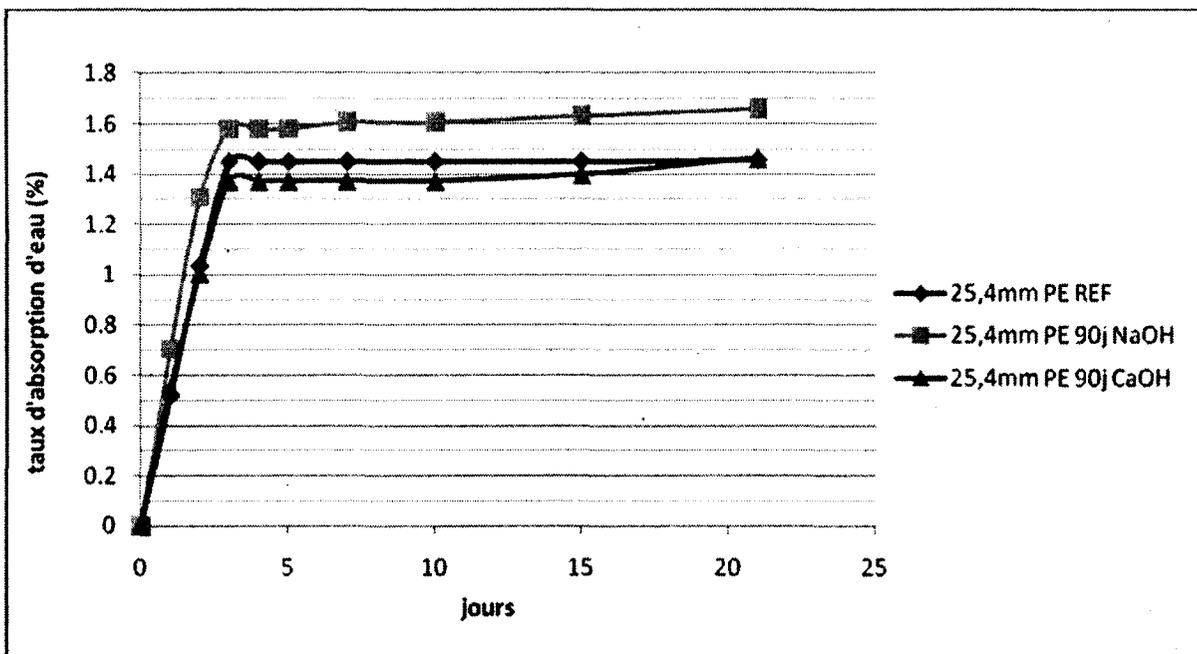


Figure 3.36 : Taux d'absorption d'eau à saturation des barres en résine polyester

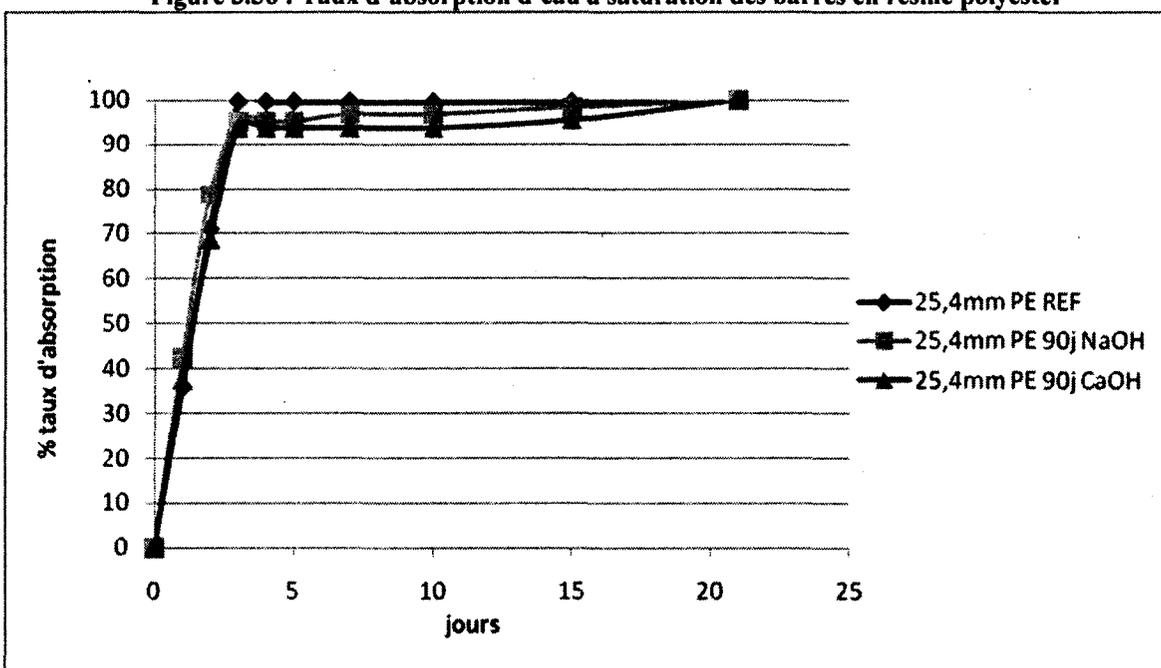


Figure 3.37 : Cinétique d'absorption résine polyester

Le tableau 3.14 présente les modules d'élasticité en flexion après conditionnement, obtenus par DMA sur les goujons les plus dégradés, soit 25,4 mm pour chaque résine. Seule la soude caustique affecte les goujons en vinylester de l'ordre de 10%. Les goujons polyester sont significativement dégradés par la soude caustique et la chaux :

Tableau 3.14 : Evolution du module d'élasticité en solutions chimiques

Module d'élasticité en flexion après conditionnement						
d	E _{ini} (Gpa)	solution	E 90j (GPa)	Ecart type (GPa)	Ecart type de la moyenne (GPa)	%E ini
25,4 mm VE	45.00	<i>Aqueduc</i>	44	0.5	0.28	98
		<i>NaOH 3%</i>	40.5	1	0.58	90
		<i>Ca(OH)2 sat</i>	44	1	0.58	98
		<i>CaCl2 3%</i>	44.5	0.5	0.28	99
25,4 mm PE	39.00	<i>Aqueduc</i>	39	0.5	0.28	100
		<i>NaOH 3%</i>	28	2	1.15	72
		<i>Ca(OH)2 sat</i>	36	2	1.15	92
		<i>CaCl2 3%</i>	38	1	0.58	97

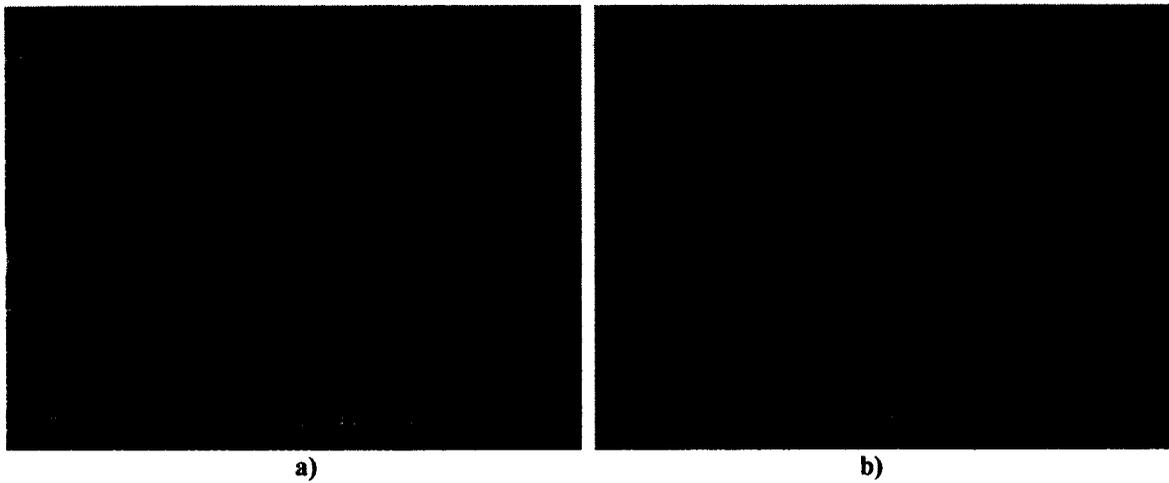
Les dégradations physiques observées en milieu très alcalin sont explicables par une dégradation irréversible de la matrice (T_g, absorption) entraînant une perte d'adhérence et une délamination plus facile au niveau de la zone d'interface fibres/matrice (E, contraintes résiduelles).

3.4.2.2 Analyse microstructurale

Les figures suivantes montrent les microstructures des goujons avant et après immersion dans la soude caustique, solution la plus dégradante :

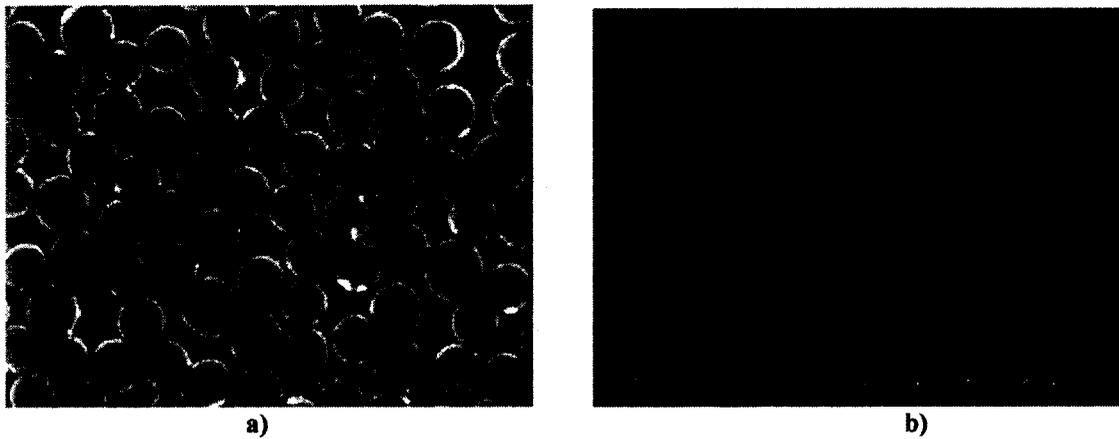


Figures 3.38 : Microscopies à l'état initial de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 500 et b) 2 000 fois

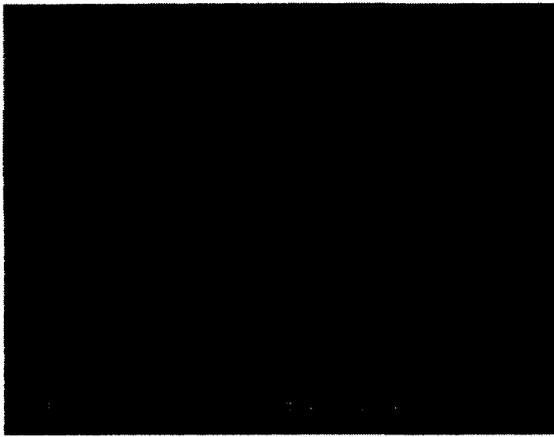


Figures 3.39 : Microscopies après 90 jours en solution de 3% NaOH de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 1 000 et b) 3 000 fois

De légères délaminations sont observables localement au niveau de l'interface, en périphérie des goujons. La structure de la matrice demeure intacte, Tg et taux d'absorption ne sont pas affectés. Ces dégradations locales confirment les sensibles baisses de la résistance et du module d'élasticité des goujons.



Figures 3.40 : Microscopies à l'état initial de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 500 et b) 5 000 fois



a)



b)

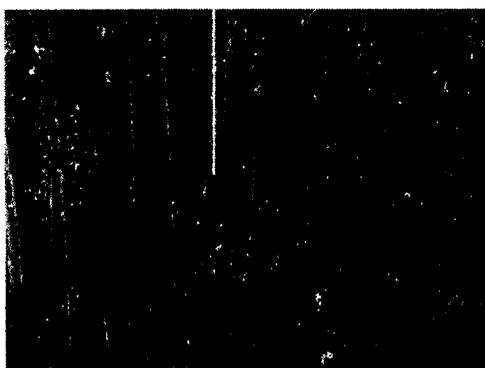
Figures 3.41 : Microscopies après 90 jours en solution de 3% NaOH de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 250 et b) 2 500 fois

Les dégradations plus largement observables sur les goujons de polyester sont concentrées à la périphérie. Les délaminations sont assez conséquentes et des fissures apparaissent à partir de la surface vers le centre de la barre. Ces dégradations conséquentes corroborent la forte baisse des performances mécaniques, de la Tg et de l'augmentation de l'absorption. La figure 3.42 montre néanmoins que le centre de la barre est peu affecté :



Figure 3.42 : Microscopies après 90 jours en solution de 3% NaOH de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm (grossissements de 500 fois au centre de la barre)

Les figures 3.43 et 3.44 montrent l'aspect de surface des goujons polyester avant et après immersion dans la solution de soude caustique. L'apparition de fissures et une dégradation de la matrice illustrent l'accroissement du taux d'absorption et de la baisse de Tg constatés :

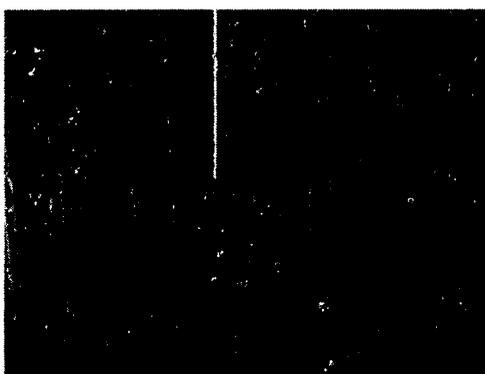


a) Référence



b) 90 jours NaOH

Figures 3.43 : Microscopies de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm (grossissements de 200 fois en surface de la barre)



a) Référence



b) 90 jours NaOH

Figures 3.44 : Microscopies de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm (grossissements de 200 fois en surface de la barre)

3.4.3 Essais de vieillissement accéléré

3.4.3.1 Résultats mécaniques et physiques

Les résultats obtenus au cisaillement direct à différentes périodes et températures sont présentés sur au figures 3.45 à 3.52 :

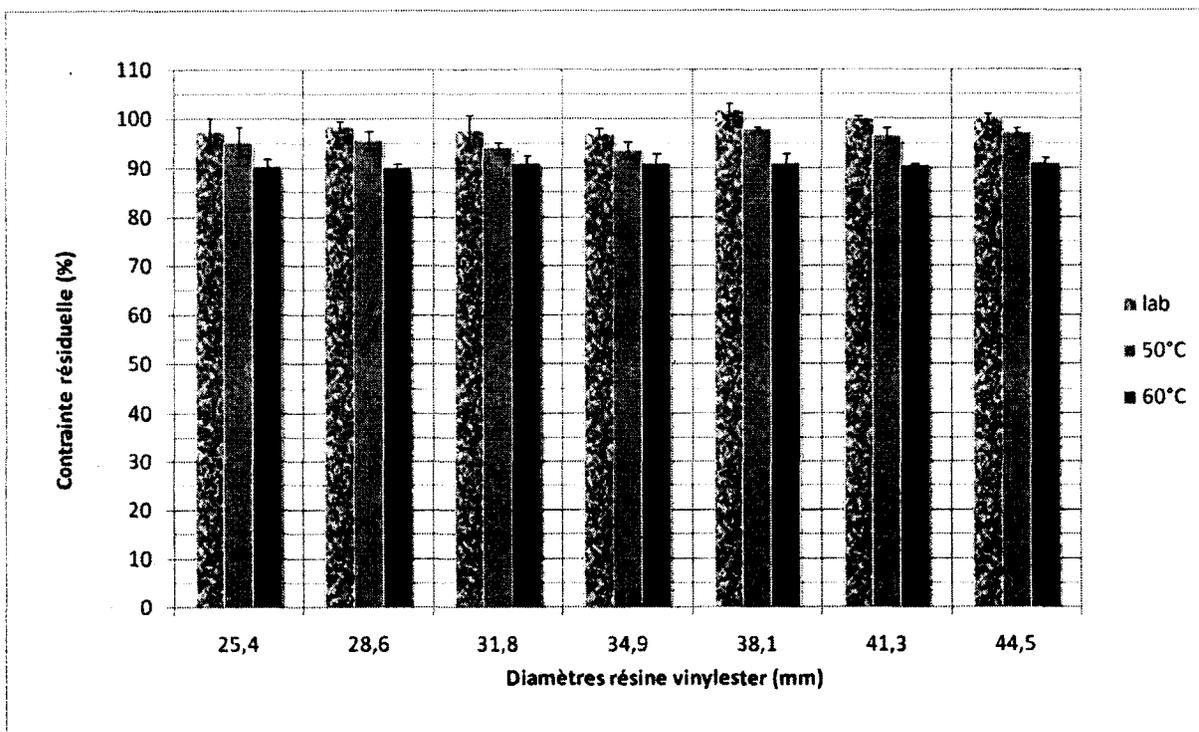


Figure 3.45 : Résistance au cisaillement direct après conditionnement (résine vinylester)

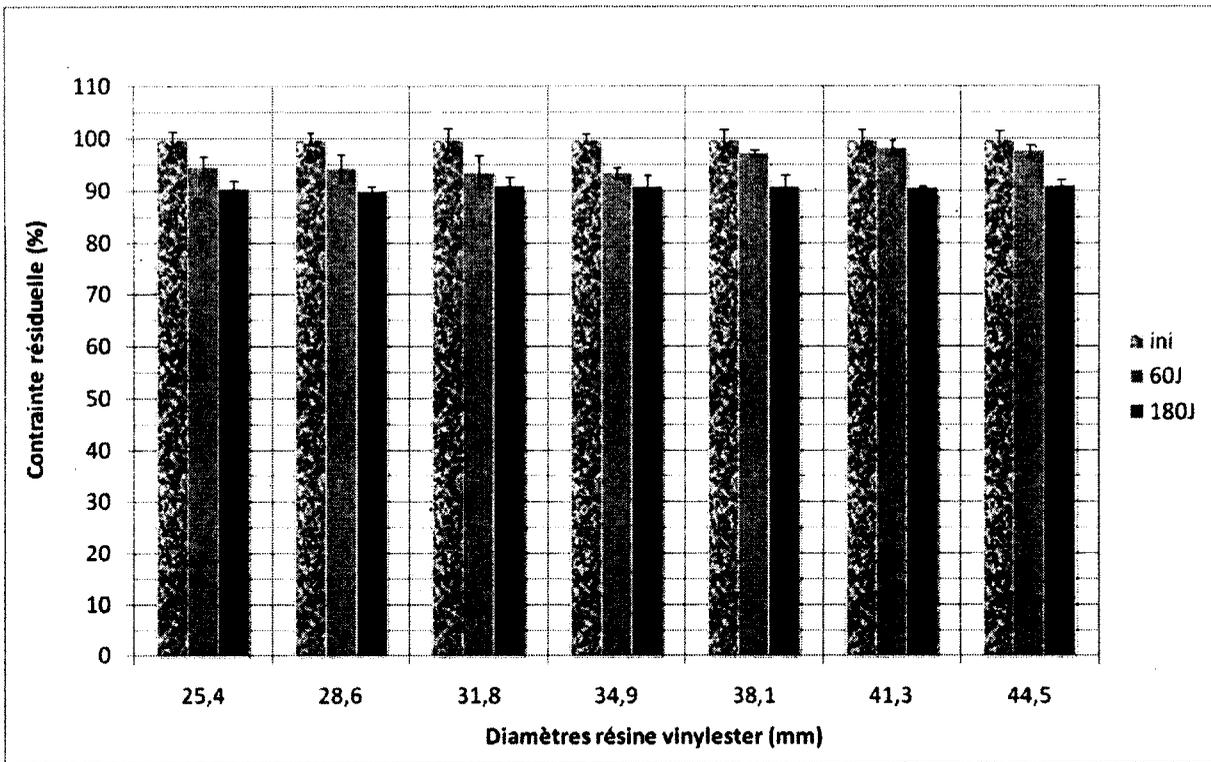


Figure 3.46 : Résistance au cisaillement direct après conditionnement (résine vinylester)

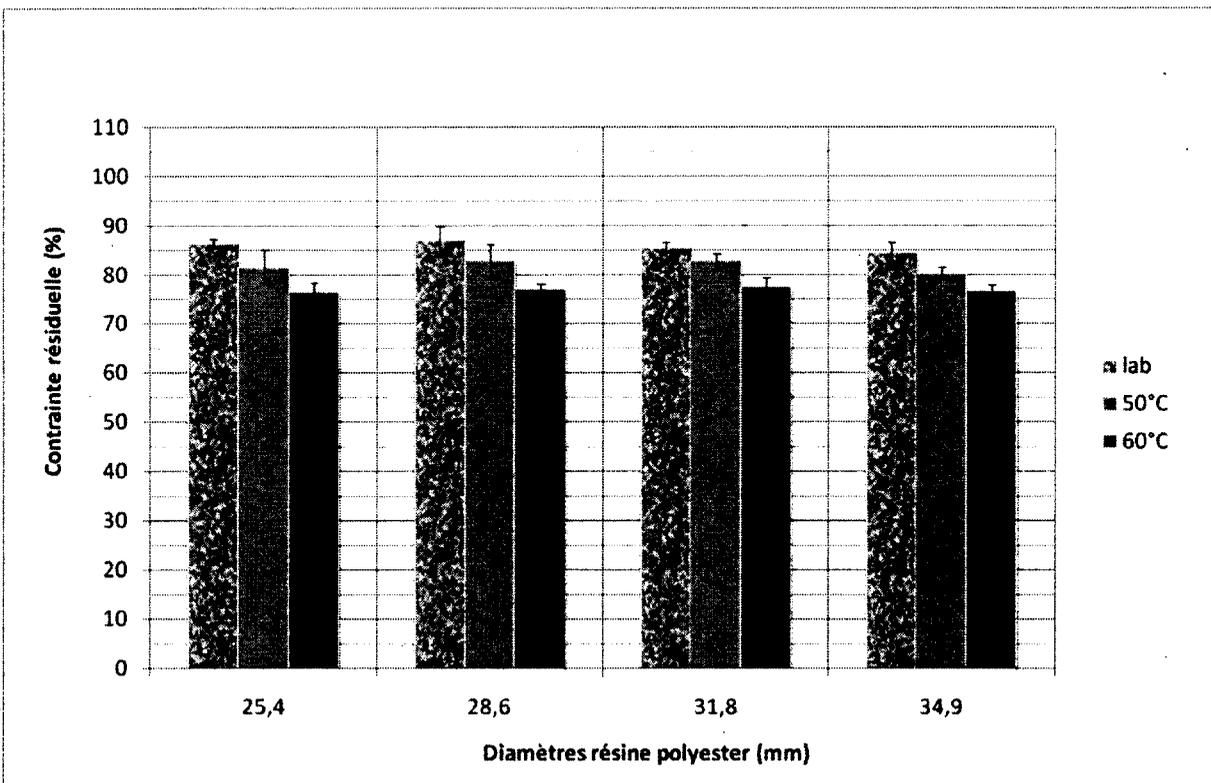


Figure 3.47 : Résistance au cisaillement direct après conditionnement (résine polyester)

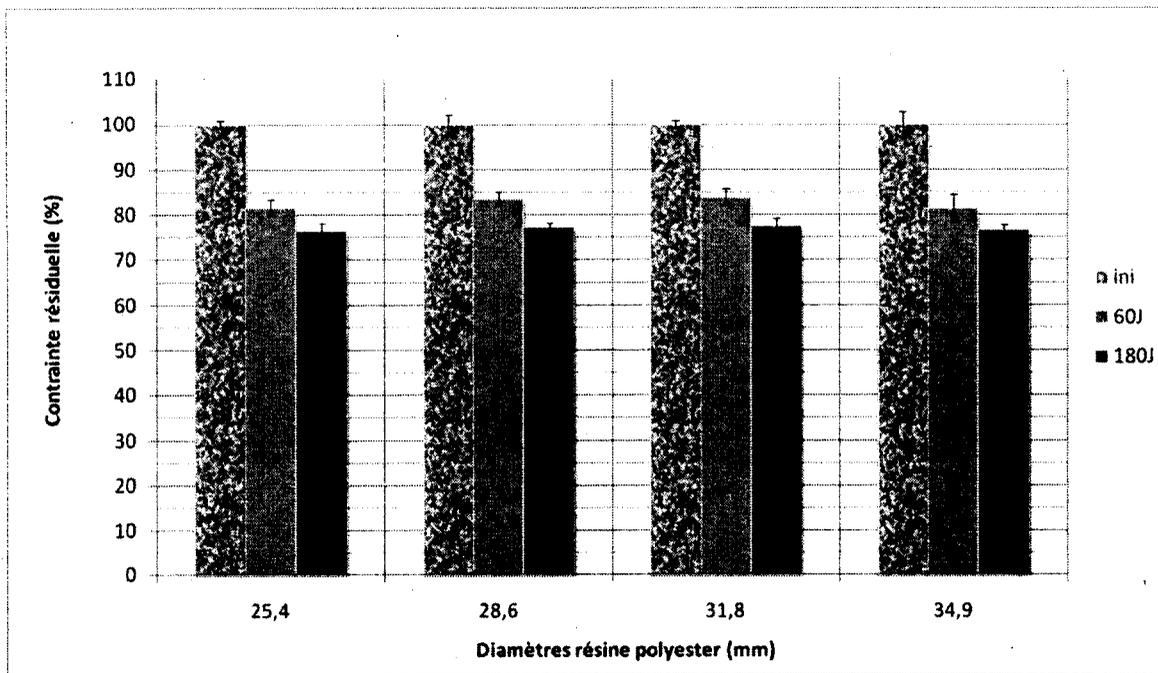


Figure 3.48 : Résistance au cisaillement direct après conditionnement (résine polyester)

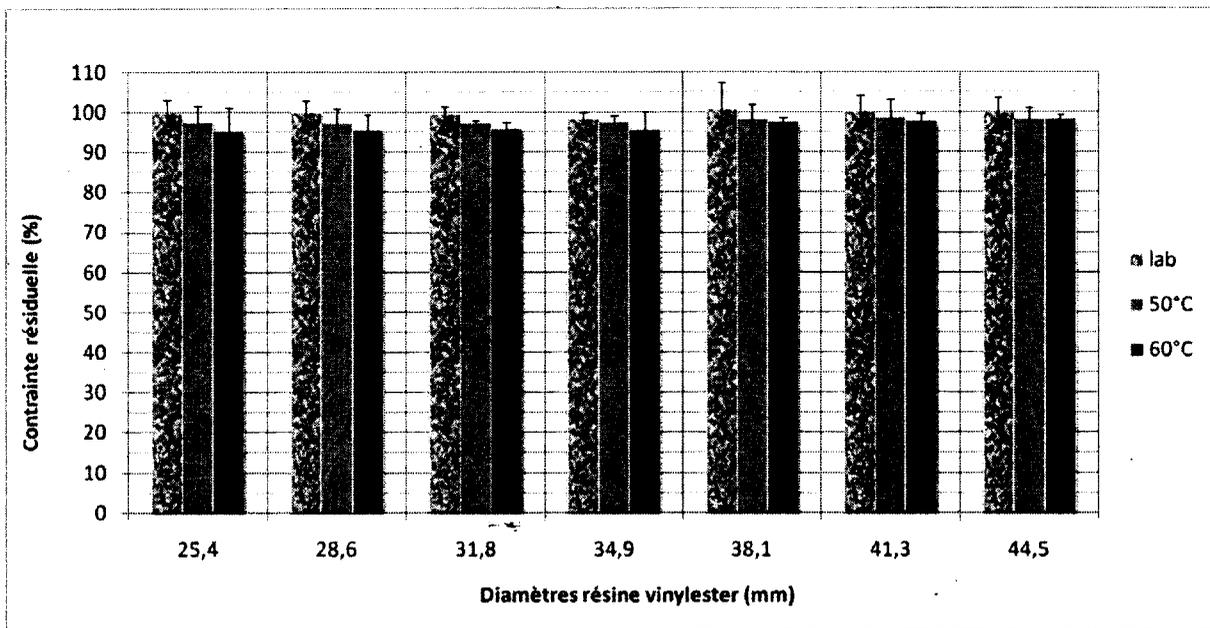


Figure 3.49 : Résistance à la flexion par 4 points après conditionnement (résine vinylester)

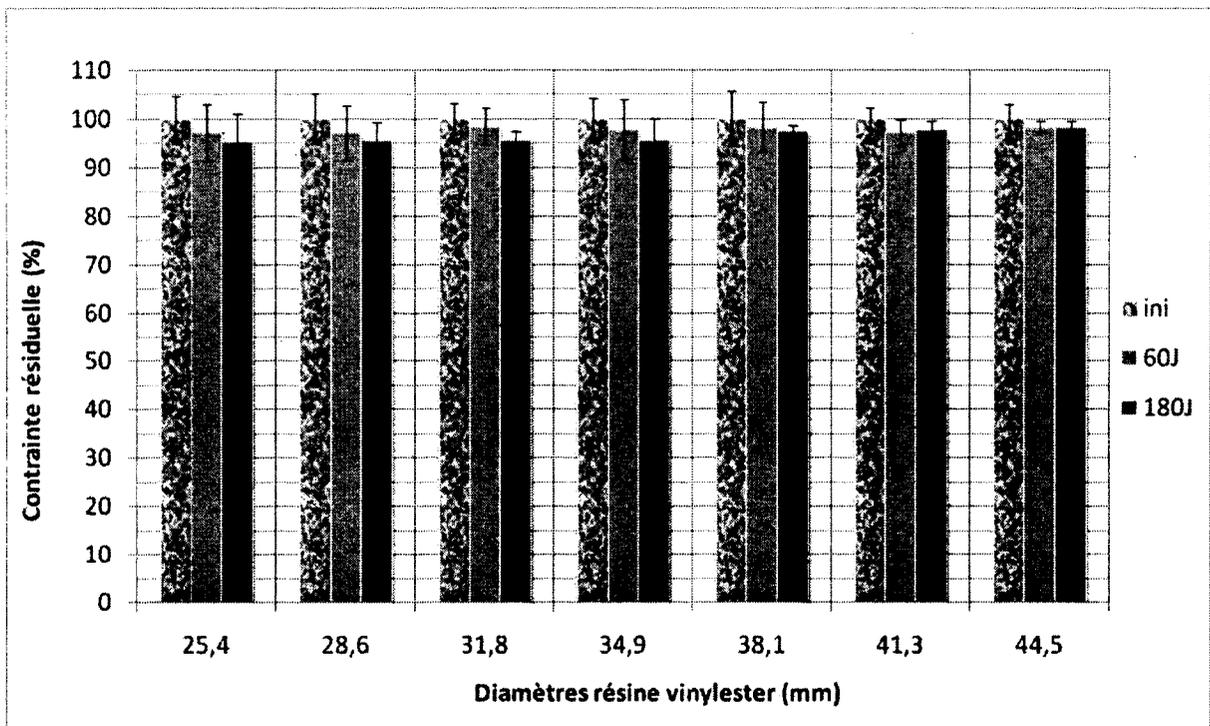


Figure 3.50 : Résistance à la flexion par 4 points après conditionnement (résine vinylester)

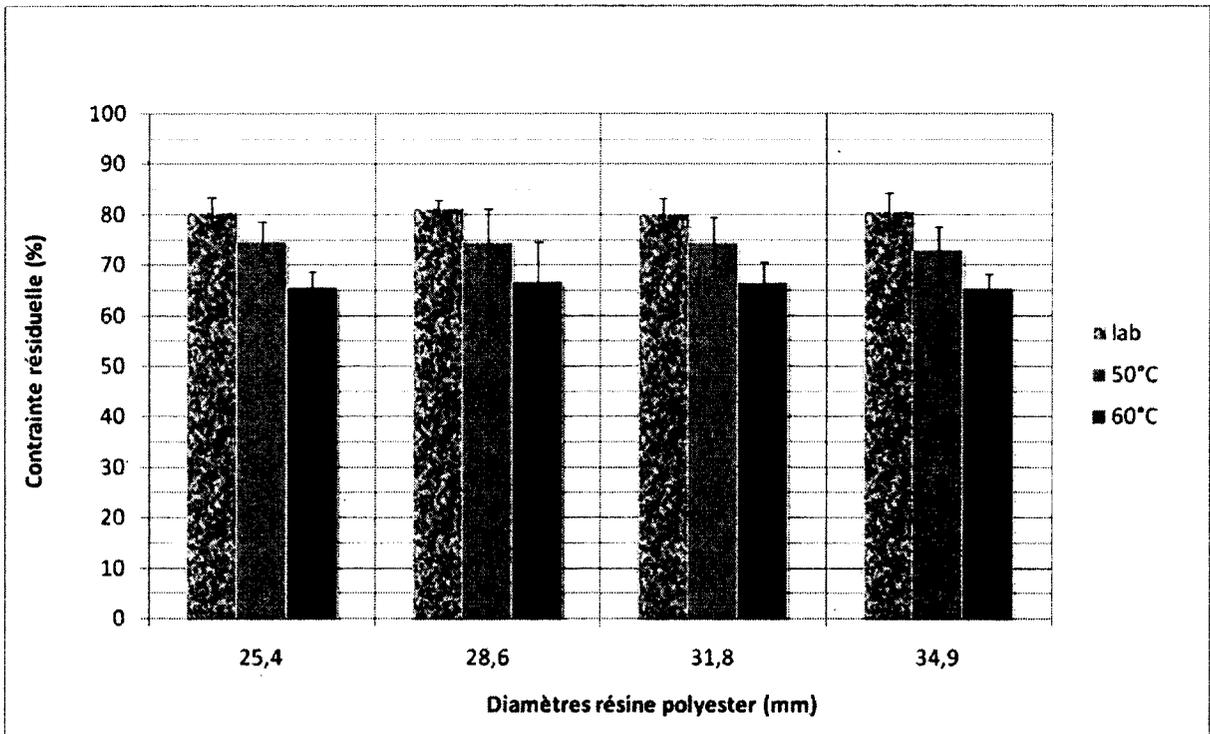


Figure 3.51 : Résistance à la flexion par 4 points après conditionnement (résine polyester)

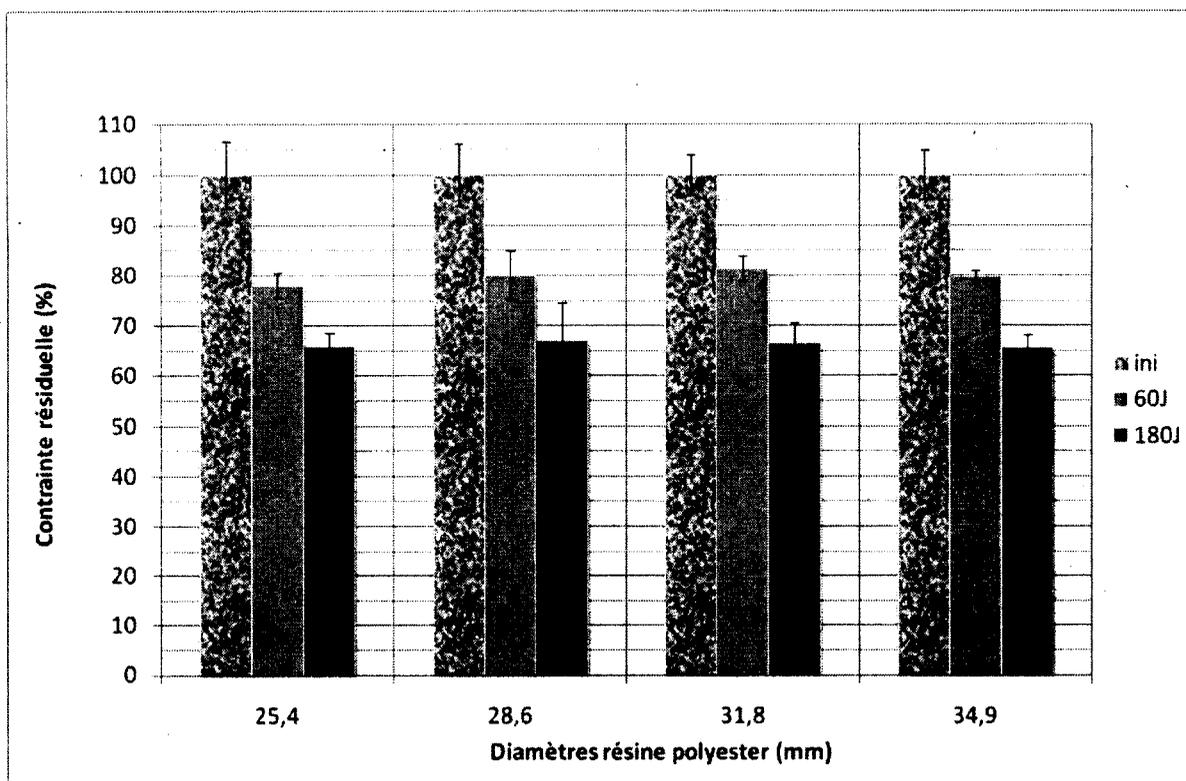
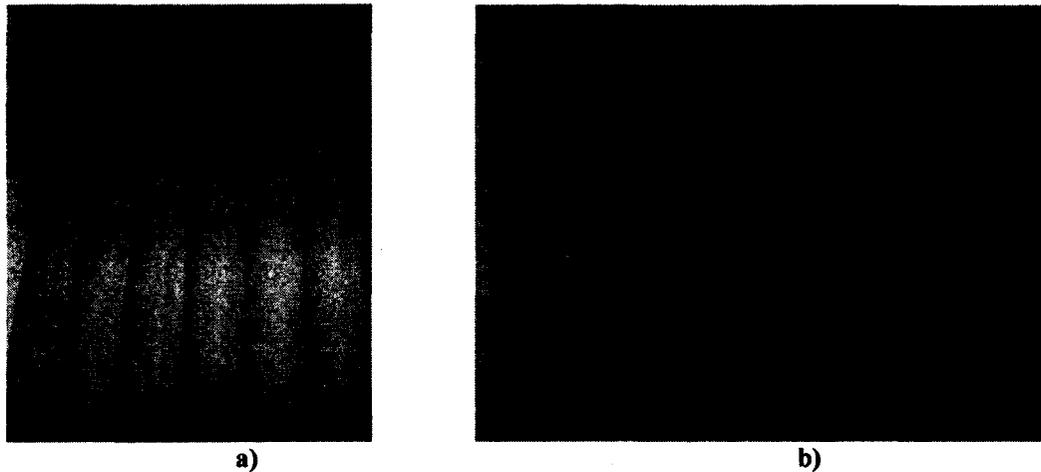


Figure 3.52 : Résistance à la flexion par 4 points après conditionnement (résine polyester)

Les variations suivantes ont été observées :

- Variation massique des spécimens négligeable (<0,20%) ;
- Perte de diamètre des spécimens négligeable (<0,10%) ;
- Les goujons en vinylester présentent des résistances résiduelles de 90 et 95% en cisaillement et en flexion respectivement. Les gros diamètres ayant une résistance légèrement supérieure du fait de la diffusion plus lente de la solution dans la barre ;
- Les goujons en polyester présentent des résistances résiduelles de 77 et 66% en cisaillement et en flexion respectivement ;
- L'absorption plus importante des goujons en polyester est caractérisée par l'apparition de rayures dans la structure des goujons à l'état de saturation. Elles s'estompent ensuite avec le séchage des spécimens (Figurés 3.53). Ceci peut caractériser la plastification de la matrice saturée en solution ;
- On observe que le taux de dégradation est le même entre 23 et 50°C et entre 50 et 60°C, illustrant le caractère exponentielle du facteur de réaction lié à la température ;

- Les baisses de résultats constatés sont confirmées par la méthode du *t test* comme présenté ci-dessous pour les goujons de vinylester 25,4 mm caractérisés au cisaillement direct après 180 jours à 60°C :
 - T_u référence = 167,49 MPa $\sigma = 2,42$ MPa
 - T_u 180j 60°C = 151,26 MPa $\sigma = 2,52$ MPa
 - $t = 9,27$ $v = 8,94$
 - $t_{99,9 \text{ table}} = 4,78$ on a bien $t_{\text{calculé}} > t_{99,9 \text{ table}}$, traduisant une différence des résultats.



Figures 3.53 : Aspect des goujons de polyester à l'état de saturation

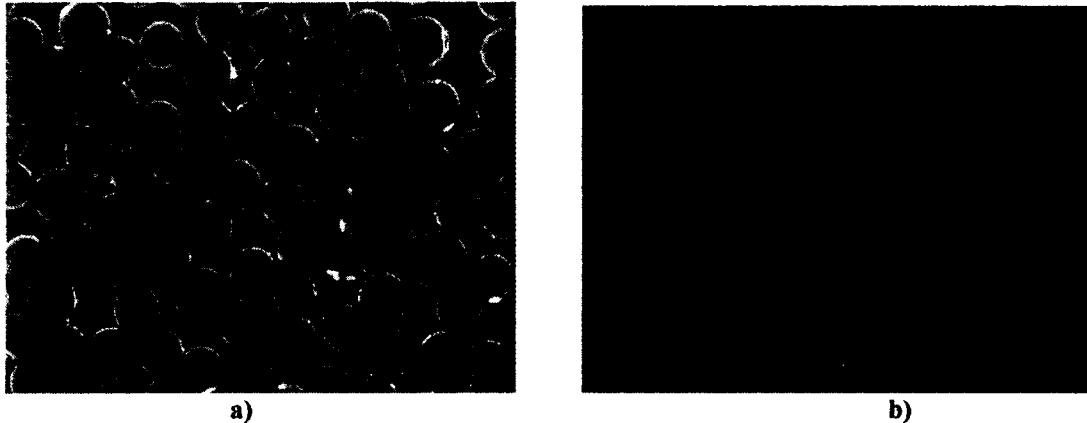
Tableau 3.15 : Variation de la Tg après vieillissement de 180 jours à 60°C

Goujons		Tg ini (°C)	Tg run 1 (°C)	Tg run 2 (°C)	%Tg ini
<i>Vinylester</i>	<i>25,4 mm</i>	118	116	115	97
	<i>34,9 mm</i>	124	122	123	99
	<i>44,5 mm</i>	125	123	123	98
<i>Polyester</i>	<i>25,4 mm</i>	87	83	82	94
	<i>34,9 mm</i>	90	84	85	94

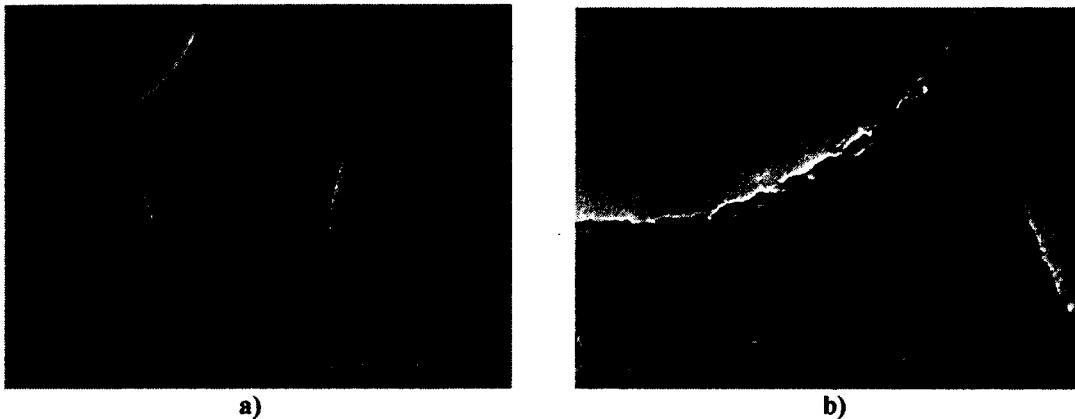
Comme montré sur le tableau 3.15, la Tg des goujons polyester est sensiblement affectée par le vieillissement, traduisant une dégradation irréversible de la matrice. Les goujons de vinylester ne présentent aucune dégradation notable.

3.4.3.2 Analyse microstructurale

Les figures 3.54 et 3.55 montrent les microstructures des goujons de polyester à l'état initial et après 180 jours d'immersion à 60°C :



Figures 3.54 : Microscopies à l'état initial de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 500 et b) 5 000 fois



Figures 3.55 : Microscopies après 180 jours d'immersion à 60°C de goujon en résine polyester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 3 000 et b) 10 000 fois

La résine polyester présentait déjà un certain nombre de pores à l'état initial. Après 180 jours de conditionnement en solution alcaline à 60°C, l'observation montre que le nombre des pores au sein de la matrice semblent augmenter légèrement. Le taux d'absorption d'eau ne variant pas, il semble qu'il ne s'agisse que de pores fermés. L'apparition de délaminations au sein de la zone d'interface est également constatée localement, d'avantage en périphérie. Les fibres demeurent cependant intactes. Ceci corrobore la baisse de résultats mécaniques obtenus.

Les Figures 3.56 et 3.57 montrent les microstructures des goujons de vinylester à l'état initial et après 180 jours d'immersion à 60°C :



Figures 3.56 : microscopies à l'état initial de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 500 et b) 2 000 fois

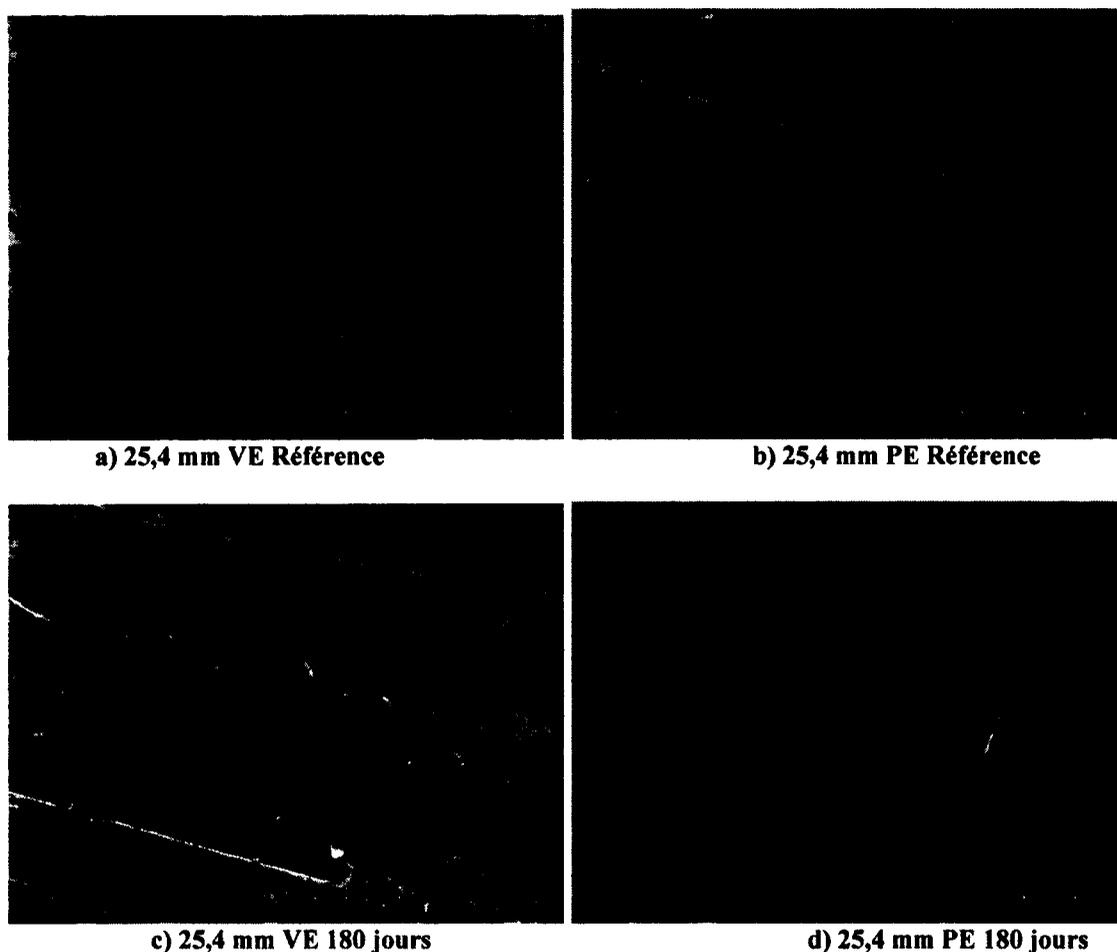


Figures 3.57 : microscopies après 180 jours d'immersion à 60°C de goujon en résine vinylester de diamètre 25,4 mm, grossissements de a) 700 et b) 3 000 fois

Les goujons en résine vinylester ne présentent aucune dégradation significative. De très légères délaminations commencent à apparaître en de rares endroits vers la surface. La structure de la matrice reste intacte et le centre de la barre conserve une parfaite intégrité.

Les figures suivantes présentent les faciès de rupture en flexion après 180 jours de conditionnement à 60°C. On observe que la résine vinylester est restée relativement adhérente

aux fibres durant la rupture. Les fibres des goujons de polyester présentent beaucoup moins de résidus matriciels supposant que la rupture s'est effectuée au niveau de l'interface par délamination et perte d'adhérence :



Figures 3.58 : Faciès de rupture en flexion de goujons de diamètre 25,4 mm après 180 jours à 60°C en solution alcaline (grossissement de 1 000 fois)

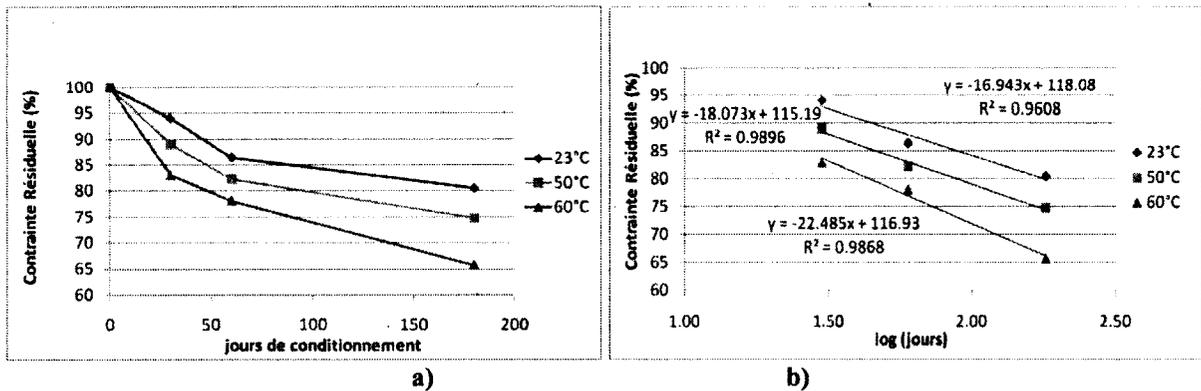
3.4.3.3 Prédiction à long terme

Des prédictions des propriétés mécaniques à long terme peuvent être réalisées selon la méthode DBT-2 « *Recommended FRP Dowel Bar Test Protocol* » à partir des résultats obtenus au cisaillement et en flexion à 30, 60 et 180 jours à trois températures.

Cette méthode est basée sur plusieurs hypothèses, dont celle selon laquelle la dégradation du composite n'est due qu'à un seul mode de dégradation dominant. De plus, le mode de

dégradation ne change pas avec la température, mais est accéléré par cette dernière. C'est pour cette raison que la température maximale de 60°C a été choisie pour ne pas provoquer d'autres phénomènes de dégradations. Selon la théorie d'Arrhenius, il est considéré que si un phénomène de dégradation seul est observé dans une certaine période et plage de température sans qu'aucun autre phénomène n'apparaisse, alors il est possible d'établir une corrélation entre dégradation et température. L'effet du temps pourra alors être augmenté en augmentant la température et effectuer ainsi des essais de vieillissement sur plusieurs semaines prédisant les propriétés à plusieurs dizaines d'années.

Les prédictions seront établies pour les goujons les plus dégradés, soit les diamètres 25,4 mm de chaque résine. Tout d'abord des courbes de la contrainte résiduelle en fonction du logarithme du temps d'immersion pour chaque température sont réalisées comme sur l'exemple suivant pour la flexion du goujon de polyester :



Figures 3.59 : Courbes de dégradation en fonction du temps et de la température a) échelle linéaire et b) logarithmique

Les droites étant assez parallèles et les coefficients de détermination étant supérieurs à 0.8, les prédictions selon les courbes d'Arrhenius peuvent être tracées. A partir de ces équations on peut déterminer le nombre de jours nécessaires pour atteindre une certaine contrainte résiduelle :

Tableau 3.16 : Jours pour atteindre un taux de rétention en flexion (goujons PE)

T°C	coefficients			jours	% rétention			
	a	b	R ²		90	75	50	25
lab	-16.943	118.08	0.9608		45	349	10427	311684
50°C	-18.073	115.19	0.9896		25	167	4046	97795
60°C	-22.485	116.93	0.9868		16	73	948	12260

A partir du tableau 3.16 on peut tracer les courbes de temps de service à différents taux de rétention en fonction de la température. Afin d'obtenir des courbes de tendance linéaires, l'échelle de la température est exprimée en $1000/T^{\circ}K$.

Il est ensuite possible d'extrapoler le temps de service nécessaire pour obtenir différents taux de rétention pour une température de 6,2°C, température annuelle moyenne de la ville de Montréal :

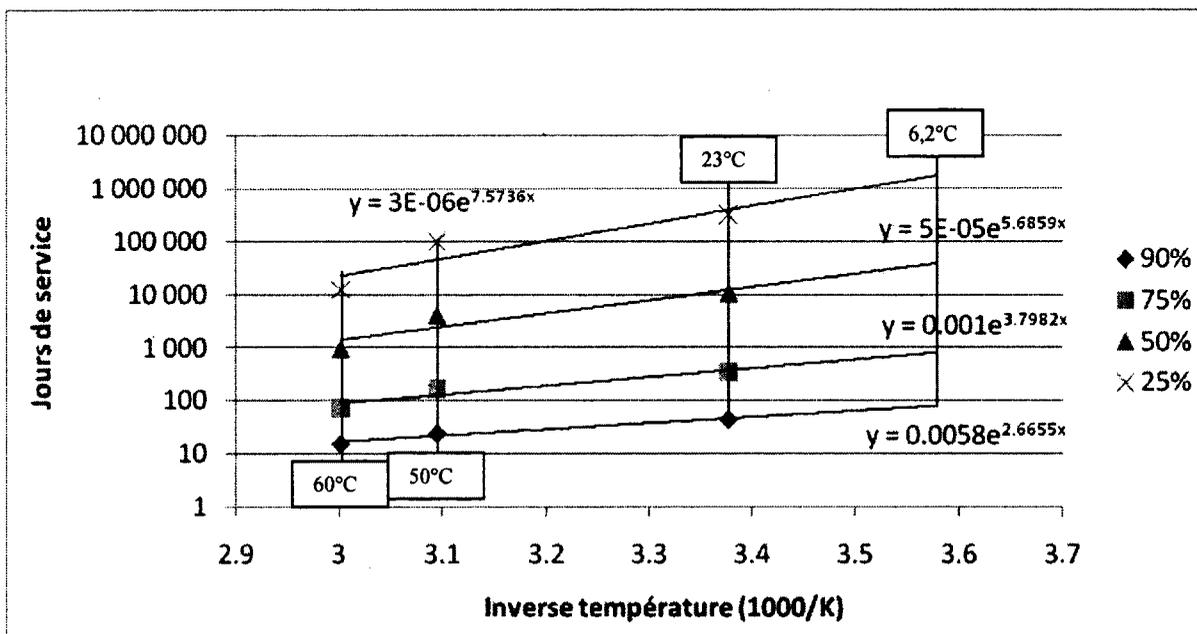


Figure 3.60 : Courbes des taux de rétention de la contrainte en flexion en fonction de la température

On peut alors obtenir par extrapolation les durées de service suivantes :

- 90% contrainte initiale à 6,2°C => 81 jours
- 75% contrainte initiale à 6,2°C => 803 jours
- 50% contrainte initiale à 6,2°C => 34 563 jours
- 25% contrainte initiale à 6,2°C => 1 784 432 jours

A partir de ces données extrapolées, on peut tracer la courbe de dégradation à 6,2°C en fonction du temps, on obtient l'équation logarithmique suivante :

$$y = -6,5113 \times \ln(x) + 80,065 \quad (3.17)$$

avec y la contrainte résiduelle en flexion
 x le nombre de jours de service

En traçant cette équation sur une échelle linéaire, on obtient la courbe théorique de dégradation du matériau. Ainsi, les courbes obtenues pour les goujons vinylester et polyester de diamètre 25,4 mm sont présentées sur la figure suivante :

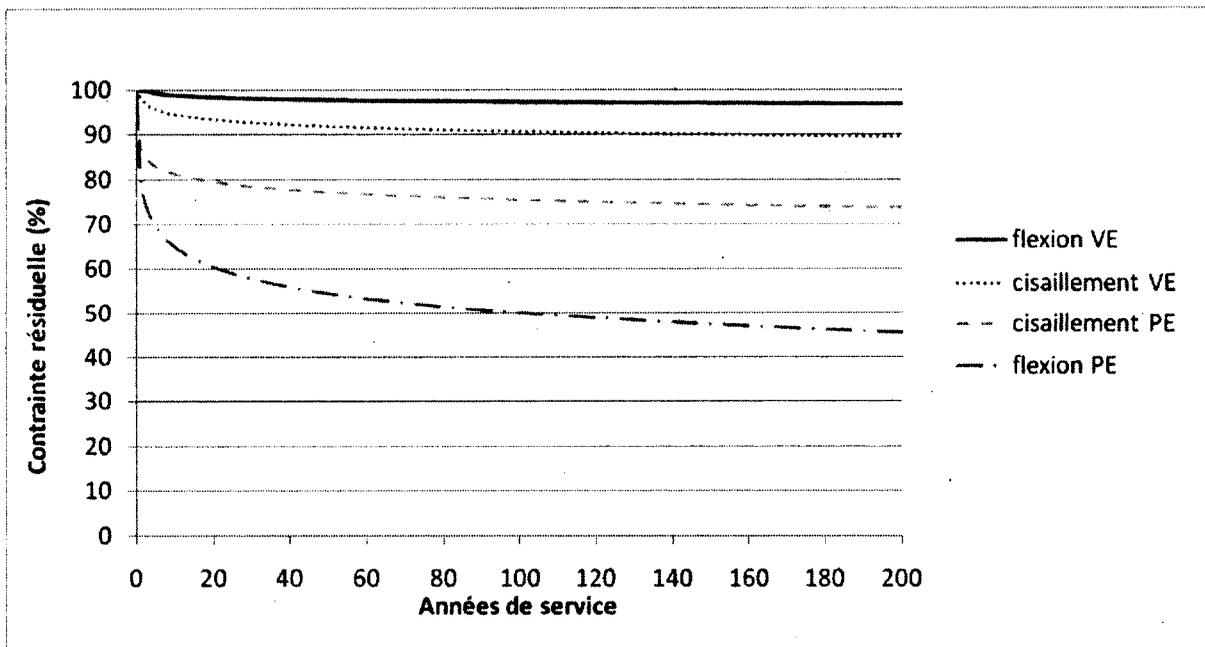


Figure 3.61 : Prédiction des propriétés mécaniques à long terme

Les goujons de vinylester présentent une excellente durabilité prédisant une contrainte résiduelle supérieure à 90% au cisaillement et 95% à la flexion à 200 ans de service.

Les goujons de polyester présentent une tenue de plus de 75% au cisaillement et 55% à la flexion à 40 ans de service. La faible baisse du module d'élasticité (<5%) permet de garantir un comportement structural équivalent malgré la perte de contrainte ultime.

Une autre procédure utilisant le concept d'Arrhenius est celle proposée par Deijke (2001). Cette procédure repose sur la détermination de facteur de changement de temps (FCT). Le FCT est déterminé en utilisant la relation d'Arrhenius entre des essais accélérés et d'autres non accélérés :

$$FCT = e^{B\left(\frac{1}{T_1+273,15} - \frac{1}{T_2+273,15}\right)} \quad (3.18)$$

*Avec B : constante déterminée à l'aide du FCT et de deux courbes connues
T₁ et T₂ sont les températures (°C) pour lesquelles le FCT est calculé*

Tout d'abord, deux courbes de rétention de la résistance en fonction du temps sur une échelle logarithmique sont tracées, pour deux vieillissements accélérés distincts. Théoriquement, les deux courbes devraient être parallèles entre elles, puisque le mécanisme de dégradation est supposé être le même peu importe le conditionnement. Le FCT est le rapport des temps requis pour dégrader un même matériau au même degré, mais à deux températures différentes. La constante B peut aisément être calculée une fois le FCT déterminé ; elle est caractéristique du matériau.

A partir des courbes d'Arrhenius obtenues précédemment, on peut calculer la constante B pour les goujons polyester pour un FCT entre 23°C et 60°C avec une rétention de 75%.

Le nombre de jours de service par jour de conditionnement en fonction de la température de conditionnement est obtenu par les FCT présentés sur la figure 3.62 :

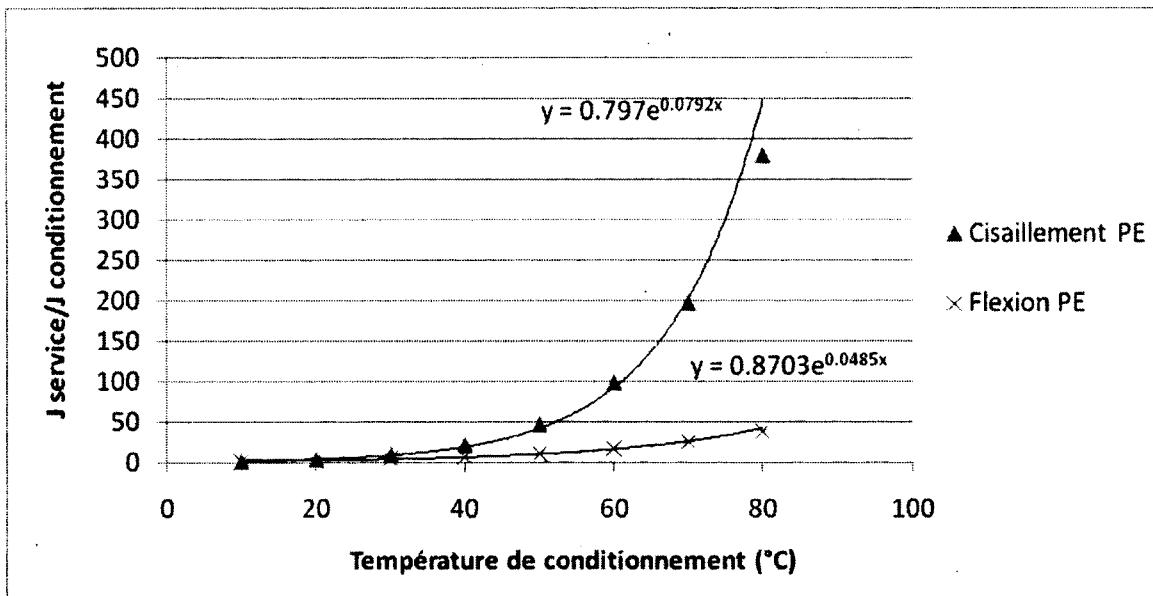


Figure 3.62 : Facteurs de changement de temps (FCT) pour chaque type de résine

Par exemple, pour le vieillissement à la flexion, 1 jour de conditionnement à 60°C correspond à 17 jours de service. Ainsi 180 jours équivalent à plus de 8 années.

C'est un autre moyen d'établir les courbes de vieillissement obtenues sur la figure 3.61.

3.5 Phase III : Étude structurale et expérimentation

3.5.1 Objectif

L'objectif de cette dernière phase est de caractériser le comportement structural des goujons de PRFV en service afin de proposer une alternative à l'acier. Des spécimens de dalles jointées sont étudiés sous chargements statiques et cycliques afin de confronter les comportements à long terme des goujons d'acier et composites. Les essais permettront de confirmer la méthode analytique de design employée et de proposer une procédure de design alternatif.

3.5.2 Conception

La conception standard pour les chaussées jointée est l'emploi de goujons d'acier de diamètre égal à $1/8^{\text{ème}}$ x l'épaisseur du pavage, espacés de 12 po ou 30 cm. Etant donné que les propriétés du matériau varient entre l'acier et les PRFV, cette conception n'est plus valide et une équivalence doit être trouvée.

L'équivalence entre l'acier et le PRFV peut être établie selon l'un des critères suivants :

- efficacité du joint ou efficience du transfert de charge similaire ;
- déflexion relative totale des dalles similaires ;
- contraintes développées autour des goujons similaires (*bearing stresses*).

La littérature assume le fait que le comportement structural des dalles reste similaire entre 2 systèmes (acier, composite) tant que les contraintes développées le reste également [Davis et Porter, 1998]. Ainsi, on peut tolérer une augmentation de la déflexion relative totale des dalles équipées de goujons de PRFV tant que les contraintes développées dans le béton restent équivalentes, le transfert de charge demeurant peu affecté.

La première méthode de design développée, et toujours la plus utilisée, est celle développée par Friberg (1940) basée sur l'analyse linéaire d'une poutre infinie reposant sur une base

élastique (figure 3.63). Cette méthode repose sur les solutions linéaires apportées par Timoshenko et Lessels (1925). Ils proposent l'équation différentielle suivante pour calculer la déflexion d'une poutre sur une base élastique selon l'équation suivante :

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -ky \quad (3.19)$$

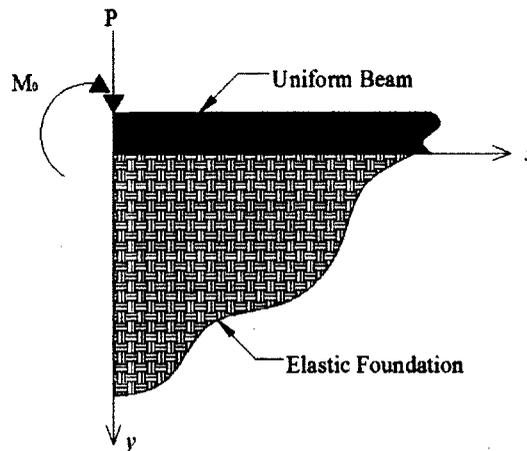


Figure 3.63 : Poutre semi-infinie sur une base élastique [Porter, 2006]

La solution générale à cette équation différentielle est donnée par l'équation suivante, illustré sur la figure 3.64 :

$$y = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 E_d I_d} \{ P_i \cos \beta x - \beta M_o (\cos \beta x - \sin \beta x) \} \quad (3.20)$$

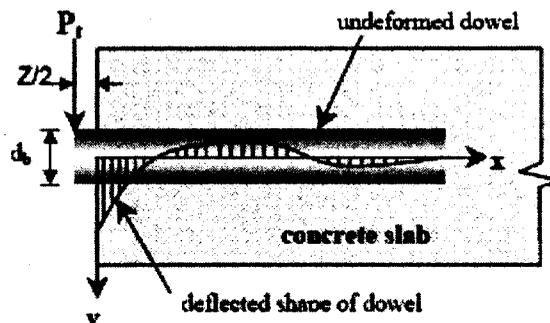


Figure 3.64 : Courbe de déflexion d'un goujon au sein du béton [Murison et al., 2002]

Dans l'équation 3.16, le moment M_o est généré par l'excentricité de la charge au niveau du joint, dépendant donc de son épaisseur :

Avec $M_o = P_t \left(\frac{z}{2} \right)$, Friberg détermine ainsi la déflexion du goujon au niveau du joint :

$$y_o = \frac{P_t}{4\beta^3 EI} (2 + \beta z) \quad (3.21)$$

Avec y_o : déformation du goujon au niveau du joint (mm)

P_t : charge de design (N)

β : rigidité relative du goujon dans le béton (mm^{-1})

E : module d'élasticité du goujon (MPa)

I : inertie du goujon (mm^4)

z : ouverture du joint (mm)

La rigidité relative du goujon dans le béton est calculée comme suit :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Kb}{4EI}} \quad (3.22)$$

Avec K : module support du goujon, réaction par unité de surface causant une unité de déflexion (MPa)

b : diamètre du goujon (mm)

E : module d'élasticité du goujon (MPa)

I : inertie du goujon (m^4)

Discussion autour de la valeur de K :

Ce module tient compte des propriétés élastiques de la masse entourant le goujon, ici le béton.

Il caractérise le développement des contraintes dans le béton par unité de déflexion de la barre.

Ainsi, ces facteurs dépendent de :

- la résistance en compression du béton, donc de son module d'élasticité ;
- le diamètre du goujon ;
- le matériau constitutif du goujon (module d'élasticité) ;
- l'ouverture du joint ;
- la géométrie transversale du goujon (rond, elliptique).

Le module K est très difficile à obtenir empiriquement, la littérature propose une valeur du module entre 300,000 et 1,500,000 pci soit entre 81 et 407 GPa/m selon les critères évoqués. Ainsi, une valeur théorique de 407 GPa/m est adoptée pour le design (1 500 000 pci, valeur sécuritaire pour le calcul des contraintes développées dans le béton) [Yoder et al., 1975]. Des études expérimentales menées par Porter et al. (2006) ont permis de caractériser le module du support du goujon sur des spécimens de dalles goudonnées. Les déflexions le long du goujon ont été mesurées à l'aide de LVDT traversant l'enrobage du béton, et les déformations à l'aide de jauges sur la face du béton au niveau du joint et sur la surface des goujons :

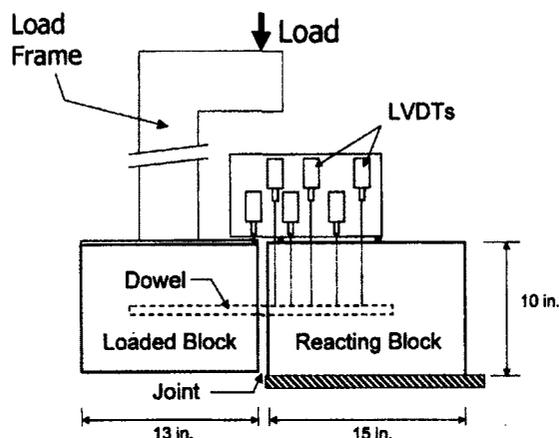


Figure 3.65 : Instrumentation de spécimens de dalles goudonnées [Porter et al., 2006]

Les valeurs de K obtenus par Porter et al. (2006) sous chargement règlementaire (ECAS de 80 kN, essieu simple) selon différents paramètres sont présentés au tableau suivant :

Tableau 3.17 : Valeurs du module K obtenues expérimentalement (pci) [Porter et al., 2006]

Dowel Type	Dowel Size	Joint Width		
		0"*	1/8"	1/2"
Round Steel	1.5	2.980.000	1.220.000	620.000
Large Elliptical Steel	2.00 x 1.375	1.280.000	640.000	560.000
Small Elliptical Steel	1.66 x 1.13	3.690.000	530.000	560.000
Round Stainless Steel	1.5	3.840.000	790.000	810.000
Round GFRP	1.875	1.190.000	360.000	410.000
Elliptical GFRP	2.25 x 1.25	1.260.000	690.000	520.000

*Cold joint

Ainsi les valeurs de K obtenues expérimentalement sont comprises entre 110 GPa/m (410,000 pci) et 1 050 GPa/m (3,900,000 pci).

On observe que :

- Plus le joint est ouvert, plus le module est bas, augmentant les déformations mais réduisant les contraintes ;
- Les goujons de PRFV présentent un module bien inférieur à l'acier ;
- Plus le diamètre augmente, plus le module diminue ;
- Les sections elliptiques ont un module inférieur.

Mannava et al. (1999) ont obtenus des valeurs comprises entre 240 GPa/m et 1 250 GPa/m en multipliant les paramètres. Il est donc très important de considérer une valeur conservatrice lors du design, tenant compte des différents paramètres énoncés.

La déflexion relative totale des dalles est composée de la somme des déformations suivantes :

- Déformation des goujons au niveau du joint : y_0
- Déformation due à la pente des goujons déformés : $\frac{zdy_0}{2dx}$
- déformation en cisaillement des goujons : δ
- déformation en flexion des goujons : $\frac{Pz^3}{12EI}$

Ainsi, la déflexion relative des dalles Δ est :

$$\Delta = 2y_0 + z\left(\frac{dy_0}{dx}\right) + \delta + \frac{Pz^3}{12EI} \quad (3.23)$$

Due à la faible dimension des joints entre dalles, les déformations dues à la pente et à la flexion des goujons sont négligeables.

$$\text{Ainsi, } \Delta = 2y_0 + \delta \quad (3.24)$$

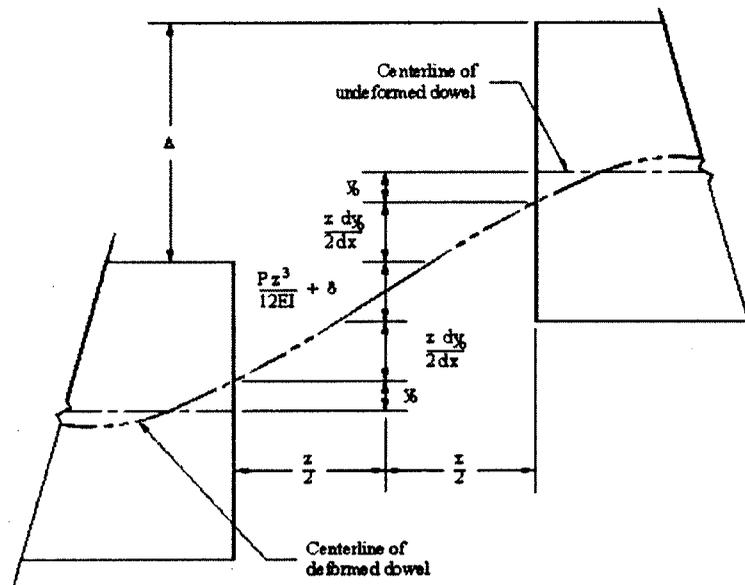


Figure 3.66 : Déflexion relative entre dalles goudonnées [Porter et al., 2006]

La déformation au cisaillement du goujon est calculée avec l'équation suivante :

$$\delta = \frac{\lambda P_t z}{AG} \quad (3.25)$$

Avec δ : déformation au cisaillement du goujon (mm)

λ : facteur de forme = $10/9$ pour les sections circulaires

P_t : charge de design (N)

z : ouverture du joint (mm)

A : section du goujon (mm²)

G : module de cisaillement du goujon (MPa)

Dû au transfert de la charge par les goujons, des contraintes se forment au niveau de l'interface béton/goujon. Partant du principe que les goujons se comportent comme une poutre sur base élastique, les contraintes développées au niveau de la face du joint sont proportionnelles aux déformations. L'objectif est de limiter ces déformations afin de limiter les contraintes internes au béton se formant autour des goujons, et plus particulièrement au niveau du joint (*bearing stresses*).

- La contrainte admissible dans le béton est calculée avec l'équation suivante [ACI Committee 325] :

$$f_b = \frac{(4-b)f'_c}{3} \quad (3.26)$$

Avec f_b : contrainte admissible (MPa)

b : diamètre du goujon (m)

f'_c : contrainte de compression du béton à 28 jours (MPa)

- Les contraintes développées sont liées aux déformations, calculées comme suit :

$$\sigma_b = Ky_o \quad (3.27)$$

Avec σ_b : contrainte développée autour du goujon (MPa)

K : module du support du goujon (GPa/m)

y_o : déformation du goujon au sein du béton (mm)

Une fois de plus, ceci justifie un choix conservateur de K puisqu'il agit directement sur le principal critère de conception.

3.5.2.1 Exemple de conception

L'exemple suivant propose une procédure étape par étape pour la conception d'une dalle jointée équipée de goujons de PRFV comme alternative à l'acier standard, les étapes et différents paramètres sont récapitulés en fin de section.

Les différents paramètres considérés sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau 3.18 : Paramètres de conception

	REFERENCE STRANDARD Goujons d'acier + époxy diam. 31,8 mm 1 ^{1/4} in		ALTERNATIVE COMPOSITE Goujons de PRFV diam. 38,1 mm 1 ^{1/2} in	
	Unités métriques (S.I)	Unités impériales	Unités métriques (S.I)	Unités impériales
Résistance à la compression du béton f'_c	35 MPa	5,076 psi	35 MPa	5,076 psi
Module d'élasticité du béton E_c	28 000 MPa	4,061,153 psi	28 000 MPa	4,061,153 psi
Hauteur du pavage h	25,4 cm	10 in	25,4 cm	10 in
Module de réaction du sol k	110 MPa/m	400 pci	110 MPa/m	400 pci
Module du support du goujon K	407 GPa/m	1,500,000 pci	270 GPa/m	1,000,000 pci
Epaisseur du joint z	6,35 mm	1/4 in	6,35 mm	1/4 in
Longueur des goujons L	457,2 mm	18 in	457,2 mm	18 in
Diamètre des goujons b	31,8 mm >h/8	1 ^{1/4} in >h/8	38,1 mm	1 ^{1/2} in
Moment d'inertie I	5,02 x 10 ⁻⁸ m ⁴	0.120 in ⁴	1,03 x 10 ⁻⁷ m ⁴	0.249 in ⁴
Aire de la section transversale A	7,94 x 10 ⁻⁴ m ²	1.23 in ²	1,14 x 10 ⁻³ m ²	1.77 in ²
Module d'élasticité du goujon E	200 000 MPa	29 x 10 ⁶ psi	45 000 MPa	6.5 x 10 ⁶ psi
Module de cisaillement du goujon G	78 000 MPa	11.3 x 10 ⁶ psi	3 300 MPa	0.48 x 10 ⁶ psi
Espacement des goujons e	30,48 cm	12 in	30,48 cm	12 in

- Le module de réaction du sol k correspond à la valeur règlementaire donnée par les services du MTQ ;
- Concernant le module K, des valeurs sécuritaires tenant compte des dernières informations de la littérature sont choisies ;
- L'ouverture du joint de 6,35 mm (1/4 in) correspond au joint de retrait le plus souvent mis en œuvre ;
- Le type de béton et l'espacement des goujons de référence sont conservés ;
- Afin de compenser la résistance moindre au cisaillement des goujons de PRFV ainsi que le module d'élasticité plus faible, un diamètre supérieur est sélectionné comparativement à l'acier.

○ **Etape 1 : Effet de groupe**

- **Détermination de l_r :**

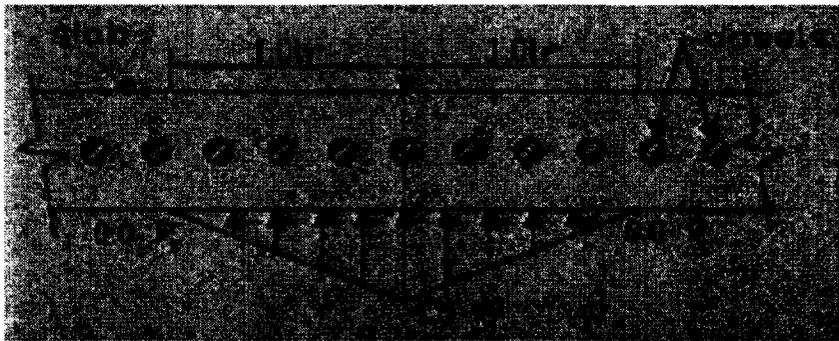


Figure 3.67 : Distribution de la charge [Davis, 1998]

$$l_r = \sqrt[4]{\frac{E_c h^3}{12(1-\mu^2)k}} = \sqrt[4]{\frac{28000 \times 0,254^3}{12(1-0,2^2)110}} = 77,572 \text{ cm}$$

○ **Etape 2 : Transfert de charge**

- **Calcul du nombre de goujons effectifs**

Afin de déterminer la charge transférée par le goujon critique il est nécessaire de calculer la répartition de la charge au sein de la dalle sur une longueur l_r , tenant compte du cas le plus défavorable en bordure de chaussée :

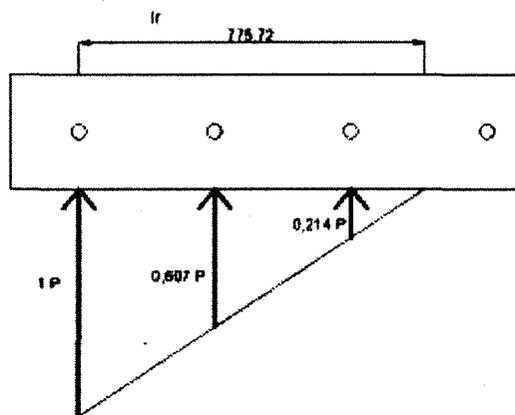


Figure 3.68 : Distribution du transfert de charge

Dans l'exemple considéré, trois goujons sont sollicités dans le cas le plus défavorable et on obtient graphiquement 1,82 goujons effectifs.

- Charge transmise par le goujon critique

Considérons un chargement de 80 kN correspondant à l'ECAS légal au Québec pour un essieu simple, la charge développée sous un pneumatique est alors de 40 kN (1/2 essieu). Cette charge va être transmise par les goujons selon la répartition présentée à la figure 3.68.

Ainsi le goujon critique va transmettre $40/1,82 = 21,98$ kN.

On admet que lors du chargement de la dalle, 50% de la charge se diffusent dans la fondation granulaire de la chaussée. On admet également une perte du transfert de charge de 5% supplémentaires par la formation de vides autour des goujons et par effet de fatigue dus au passage répété des véhicules.

Ainsi la charge de design est $21,98 \times 45\% = 9,89$ kN.

o Etape 3 : Déflexion relative des dalles

- Référence acier

Rigidité relative du goujon dans le béton :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Kb}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{407000 \times 0,0318}{4 \times 200000 \times 5,02 \times 10^{-8}}} = 23,83 \text{ m}^{-1}$$

Validité de l'équation 3.15 :

$$\beta \times L = 23,83 \times \left(\frac{457,2 - 6,35}{2 \times 1000} \right) = 5,37 > 2, \text{ Validé}$$

Déformation du goujon au niveau du joint :

$$y_o = \frac{P_i}{4\beta^3 EI} (2 + \beta z) = \frac{9,89 \times 10^3}{4 \times 23,83^3 \times 200000 \times 5,02 \times 10^{-8}} (2 + 23,83 \times 6,35 \times 10^{-3}) \times 10^3 = 0,0392 \text{ mm}$$

Déformation au cisaillement du goujon :

$$\delta = \frac{\lambda P_i z}{AG} = \frac{10/9 \times 9890 \times 6,35}{794,23 \times 78000} = 1,13 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

Déflexion relative totale :

$$\Delta = 2y_0 + \delta = 2 \times 0,0392 + 1,13 \times 10^{-3} = 0,0795 \text{ mm}$$

- Alternative PRFV

Rigidité relative du goujon dans le béton :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Kb}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{270000 \times 0,0381}{4 \times 45000 \times 1,03 \times 10^{-7}}} = 27,30 \text{ m}^{-1}$$

Validité de l'équation 3.15 :

$$\beta \times L = 27,30 \times \left(\frac{457,2 - 6,35}{2 \times 1000} \right) = 6,15 > 2 \text{ Vérifié}$$

Déformation du goujon au niveau du joint :

$$y_0 = \frac{P_l}{4\beta^3 EI} (2 + \beta z) = \frac{9,89 \times 10^{-3}}{4 \times 27,30^3 \times 45000 \times 1,03 \times 10^{-7}} (2 + 27,30 \times 6,35 \times 10^{-3}) \times 10^3 = 0,0570 \text{ mm}$$

Déformation au cisaillement du goujon :

$$\delta = \frac{\lambda P_l z}{AG} = \frac{10/9 \times 9890 \times 6,35}{1140,09 \times 3300} = 0,0185 \text{ mm}$$

Déflexion relative totale :

$$\Delta = 2y_0 + \delta = 2 \times 0,0570 + 0,0185 = 0,132 \text{ mm}$$

○ **Etape 4 : Vérification des contraintes dans le béton**

- Référence acier

Contrainte admissible :

$$f_b = \frac{(4-b)f'_c}{3} = \frac{\left(4 - \frac{31,8}{1000}\right) \times 35}{3} = 46,30 \text{ MPa}$$

Contrainte développée :

$$\sigma_b = Ky_0 = 407 \times 0,0392 = 15,95 \text{ Mpa} < 46,30 \text{ MPa Vérifié}$$

- Alternative PRFV

Contrainte admissible :

$$f_b = \frac{(4-b)f'_c}{3} = \frac{\left(4 - \frac{38,1}{1000}\right) \times 35}{3} = 46,22 \text{ Mpa}$$

Contrainte développée :

$$\sigma_b = Ky_o = 270 \times 0,0570 = 15,39 \text{ MPa} < 46,22 \text{ MPa Vérifié}$$

$$\frac{\Delta_{PRFV}}{\Delta_{ACIER}} = \frac{0,132}{0,0795} = 1,66$$

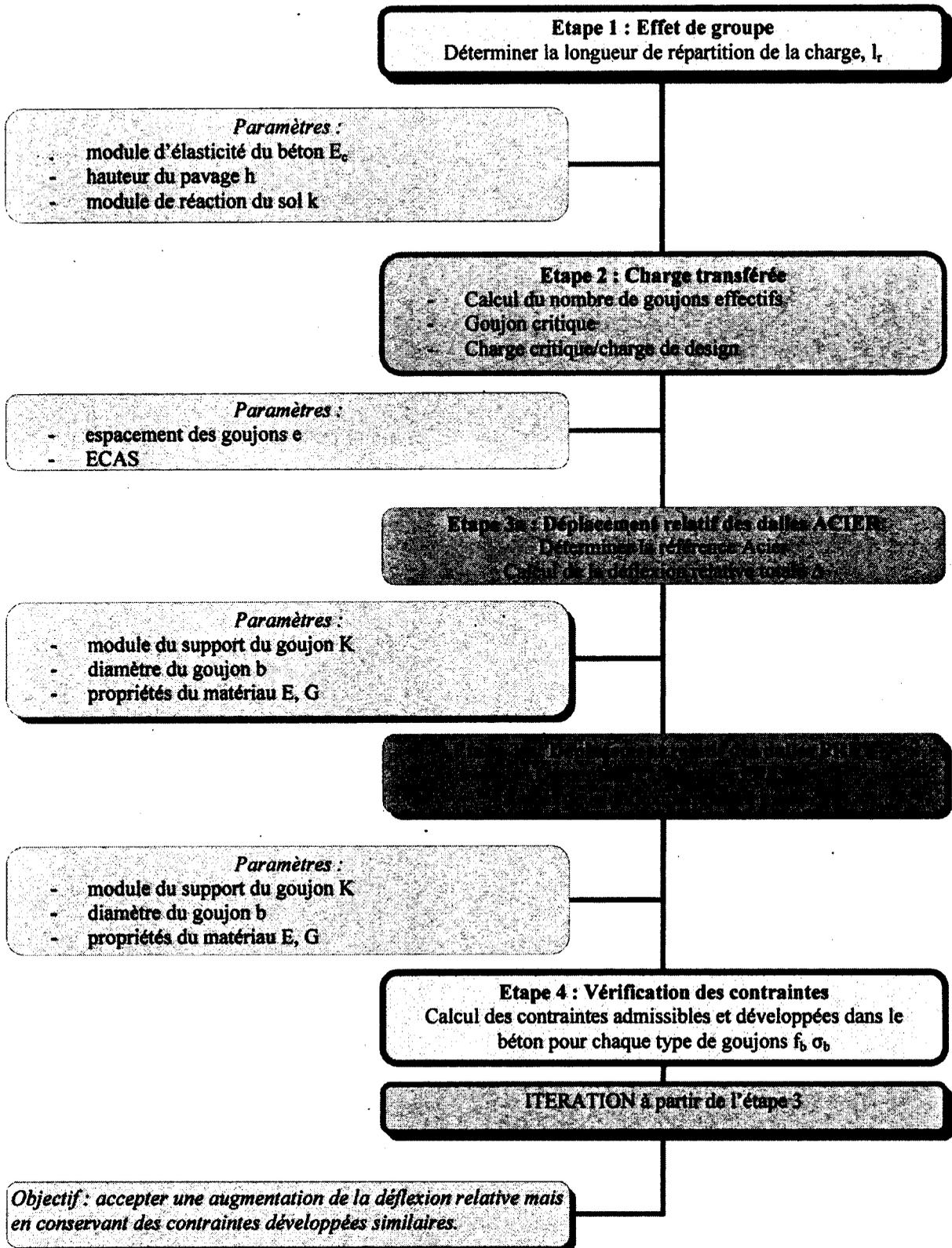
$$\frac{\sigma_b, PRFV}{\sigma_b, ACIER} = \frac{15,39}{15,95} = 0,96$$

La déflexion relative totale est supérieure de 66% avec des goujons de 38,1 mm de PRFV comparativement à ceux d'acier de 31,8 mm. Le plus faible module K permet de d'obtenir des contraintes développées inférieures à l'acier (96%), ce qui valide en théorie l'alternative proposée. Ainsi, des goujons de PRFV de 38,1 mm de diamètre pourraient remplacer les goujons d'acier de 31,8 mm de diamètre usuellement utilisés pour un espacement de 12 po (30,48 cm).

3.5.2.2 Récapitulatif de la procédure

Le cheminement à suivre pour le design d'une alternative PRFV d'une chaussée jointée est donné par le tableau 3.19 :

Tableau 3.19 : Procédure de conception



A partir des itérations effectuées, on peut proposer plusieurs solutions alternatives à l'acier en faisant varier :

- Le diamètre des goujons b ;
- L'espacement des goujons e .

Avec ces paramètres fixés :

- résistance en compression du béton f'_c ;
- hauteur du pavage h ;
- caractéristiques du sol support k .

3.5.3 Expérimentation

Ce paragraphe présente les essais expérimentaux qui ont été menés afin de valider la méthode de design proposée précédemment.

3.5.3.1 Spécimens de dalles jointées

Des spécimens de dalles jointées à échelle réduite ont été réalisées afin d'évaluer leur performance structurale sous chargement réglementaire et au delà. Afin de pouvoir confronter les résultats avec d'éventuels futurs projets in-situ, les charges sont appliquées sur les dalles sur une section de $0,073 \text{ m}^2$, soit une plaque de répartition circulaire de 12 po (304,8 mm) conformément à l'essai du déflectomètre à masse tombante. Cette section représente la surface de contact entre un pneumatique typique d'essieu simple et la dalle.

- Conception

Les travaux analytiques et expérimentaux de Keeton et Bishop (1957) ont permis d'établir que l'effort tranchant transmis par un goujon dans un pavage devient négligeable à partir d'une distance de l'ordre de 1,20 m (4 pieds) depuis le joint. Cette valeur a été validée par modélisation aux éléments finis et vérifiée expérimentalement par Maitra et al. (2009).

Les dimensions retenues pour les présents essais structuraux sont donc les suivantes :

- goudons de 456,4 mm (18 po) de longueur, espacés de 304,8 mm (12 po), conformément au design courant ;
- 60,96 cm (2 pieds) de largeur ;
- 2,4384 m (4 pieds) de longueur ;
- 25,4 cm (10 po) d'épaisseur ;
- joint d'expansion thermique de 19,05 mm (3/4 po).

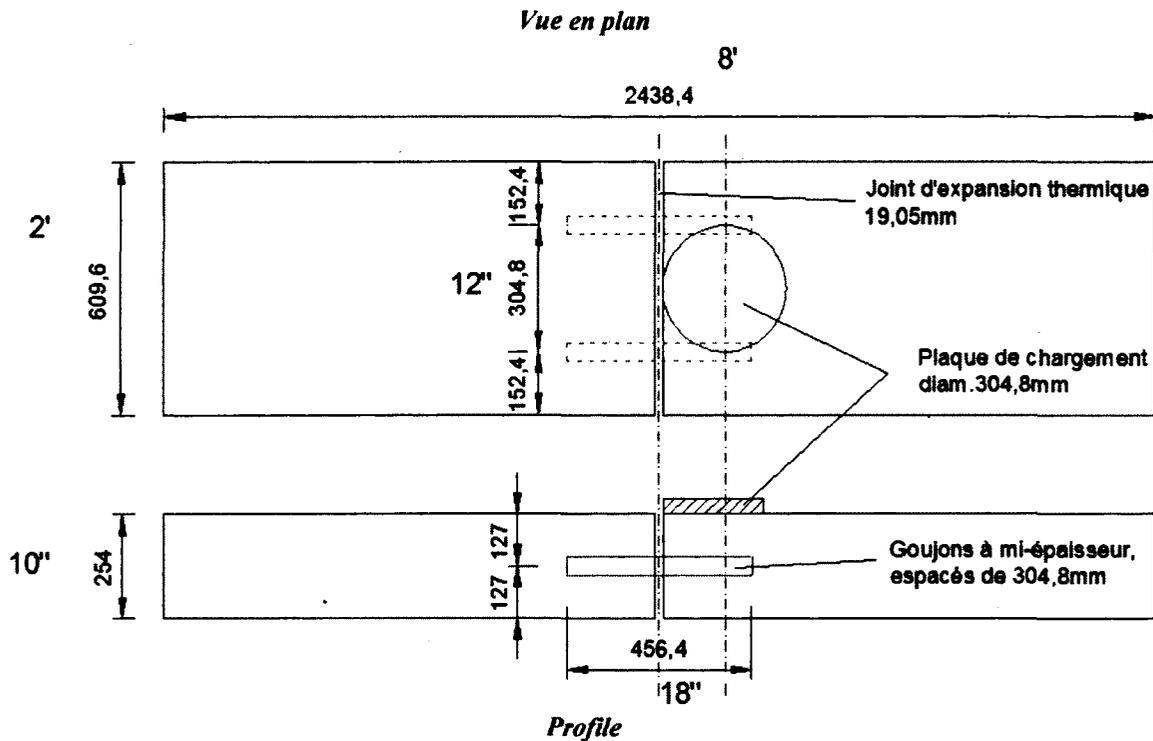


Figure 3.69 : Dimensions des spécimens de dalle étudiés (mm)

Une ouverture de joint de 19,05 mm (3/4 po) est choisie pour confronter la performance structurale des goudons de PRFV et d'acier dans le cas le plus défavorable pour les PRFV.

La longueur de répartition de la charge l_r étant toujours supérieure à l'espacement $e = 304,8$ mm, au moins 2 goudons seront sollicités, c'est pourquoi une largeur de dalle de 609,6 mm (2 pieds = $2 \times e$) est retenue.

Cependant, dans la méthodologie de design proposée précédemment, il faut tenir compte des dimensions réduites des spécimens. Ainsi selon la procédure on obtient une longueur de répartition de la charge $l_r = 775,72$ mm. La largeur des dalles étant de 609,6 mm, les deux

goujons seront sollicités au transfert de la charge. Il n'y a donc pas 1,82 goujons effectifs mais 2, réduisant la charge transférée. On peut donc réduire le diamètre des goujons sous même chargement afin de ne pas surestimer leur performance. Ainsi en réduisant le diamètre des goujons en acier de référence à 28,6 mm, on conserve une déflexion relative totale des dalles équivalente à un système équipé en goujons de 31,8 mm avec $l_r = 775,72$ mm :

Tableau 3.20 : Variation des paramètres à échelle réduite

	Acier 31,8mm	Acier 31,8mm	Acier 28,6mm
l_r	775,75 mm	609,6 mm	609,6 mm
Goujons effectifs	1,82	2	2
Charge design	9,89 kN	9 kN	9 kN
Ouverture du joint z	19,05 mm	19,05 mm	19,05 mm
Déflexion relative totale	0,095 mm	0,080 mm	0,103

En choisissant un diamètre d'acier de référence de 28,6 mm, on se place en position conservatrice. La procédure de design permet de proposer deux alternatives possibles aux goujons d'acier de 28,6 mm. Les différents paramètres de conception sont présentés au tableau 3.20, les résultats théoriques pour chaque alternative sont présentés au tableau 3.21.

Tableau 3.21 : Paramètres de conception

	REFERENCE STRANDARD Goujons d'acier + époxy diam. 28,6 mm		ALTERNATIVE COMPOSITE 1 Goujons de PRFV diam. 34,9 mm		ALTERNATIVE COMPOSITE 2 Goujons de PRFV diam. 38,1 mm	
Résistance à la compression du béton f'_c	45 MPa	5,076 psi	45 MPa	5,076 psi	45 MPa	5,076 psi
Module d'élasticité du béton E_c	31 750 MPa	4,605,000 psi	31 750 MPa	4,605,000 psi	31 750 MPa	4,605,000 psi
Hauteur du pavage h	25,4 cm	10 in	25,4 cm	10 in	25,4 cm	10 in
Module de réaction du sol k	110 MPa/m	400 pci	110 MPa/m	400 pci	110 MPa/m	400 pci
Module du support du goujon K	407 GPa/m	1,500,000 pci	270 GPa/m	1,000,000 pci	270 GPa/m	1,000,000 pci
Epaisseur du joint z	19,05 mm	3/4 in	19,05 mm	3/4 in	19,05 mm	3/4 in
Longueur des goujons L	457,2 mm	18 in	457,2 mm	18 in	457,2 mm	19 in
Diamètre des goujons b	28,6 mm	1 ^{1/8} in	34,9 mm	1 ^{3/8} in	38,1 mm	1 ^{1/2} in
Moment d'inertie I	$3,28 \times 10^{-8} \text{ m}^4$	0.079 in ⁴	$7,28 \times 10^{-8} \text{ m}^4$	0.175 in ⁴	$1,03 \times 10^{-7} \text{ m}^4$	0.249 in ⁴
Aire de la section transversale A	$6,42 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	0,99 in ²	$9,57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	1.485 in ²	$1,14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	1.77 in ²
Module d'élasticité du goujon E	200 000 MPa	29×10^6 psi	50 000 MPa	7.25×10^6 psi	50 000 MPa	7.25×10^6 psi
Module de cisaillement du goujon G	78 000 MPa	11.3×10^6 psi	3 300 MPa	0.48×10^6 psi	3 300 MPa	0.48×10^6 psi
Espacement des goujons e	30,48 cm	12 in	30,48 cm	12 in	30,48 cm	12 in

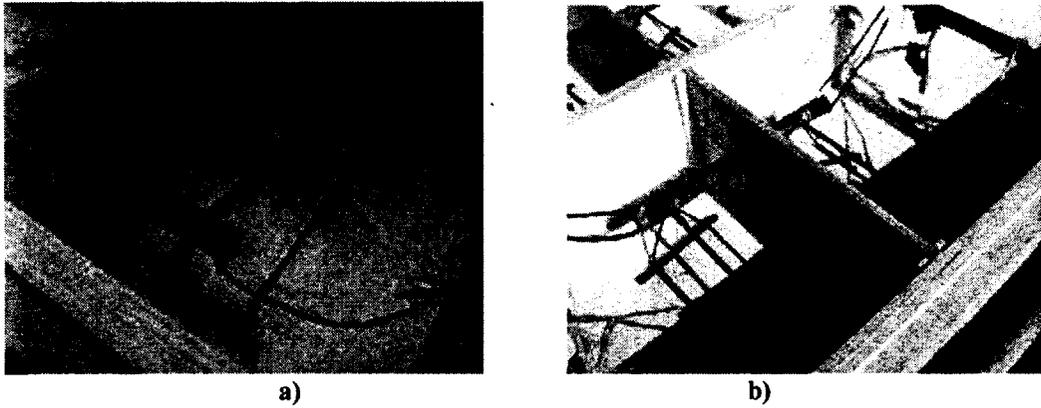
Tableau 3.22 : Résultats théoriques des alternatives

	REFERENCE STRANDARD Goujons d'acier + époxy diam. 28,6 mm	ALTERNATIVE COMPOSITE 1 Goujons de PRFV diam. 34,9 mm	ALTERNATIVE COMPOSITE 2 Goujons de PRFV diam. 38,1 mm
Charge de design sous ECAS=80 kN	9 kN	9 kN	9 kN
Rigidité relative β (/m)	25,80	28,36	26,56
Déformation au niveau du joint y_0 (mm)	0,0497	0,0688	0,0582
Déformation au cisaillement δ (mm)	0,0038	0,0603	0,0506
Déflexion relative totale Δ (mm)	0,103	0,198	0,167
Contrainte admissible f_b (MPa)	59,57	59,48	59,43
Contrainte développée σ_b (MPa)	20,23	18,58	15,72
$\frac{\Delta_{PRFV}}{\Delta_{ACIER}}$	S.O	1,92	1,62
$\frac{\sigma_b PRFV}{\sigma_b ACIER}$	S.O	0,92	0,78

Selon le critère de limitation des contraintes, les goujons de PRFV de 34,9 mm de diamètre sont une alternative possible. Les essais structuraux permettent de caractériser l'influence de la déflexion relative supérieure sur le transfert de charge ($\frac{\Delta_{PRFV}}{\Delta_{ACIER}} > 1,92$).

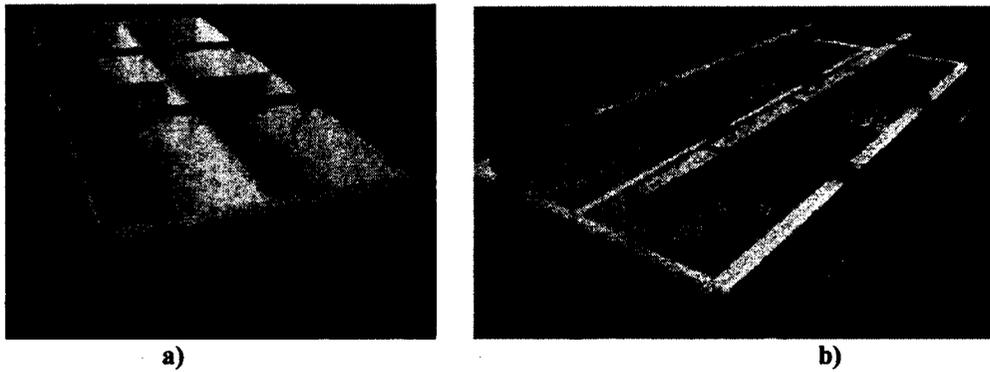
- Réalisation

Deux dalles pour chaque alternative ont été coulées puis mûries pendant 28 jours avant d'effectuer les essais structuraux. Le béton utilisé 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 kg/m³ avec un rapport E/C < 0,42 assurant une résistance à la flexion de 4,5 MPa à 28 jours. 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 est 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 goujons sont équipés de jauges de déformations de 10 mm en face inférieure pour les essais statiques et sur les deux faces pour les essais cycliques comme présenté sur les figures suivantes :

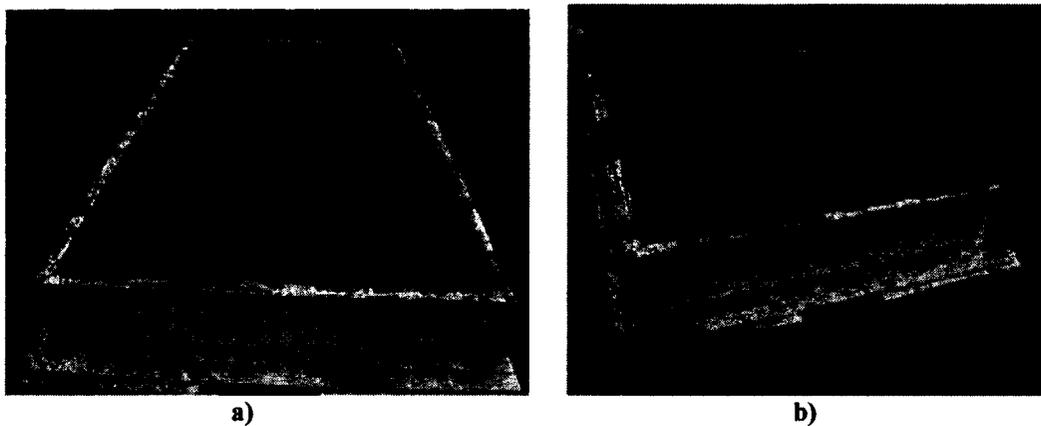


Figures 3.70 : Disposition et instrumentation des goujons au niveau du joint a) pour essai statique et b) pour essai cyclique

Les dalles ont été réalisées 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.



Figures 3.71 : Coffrage des dalles jointées



Figures 3.72 : Surfaçage et mûrissement humide des dalles jointées

Cinq éprouvettes cylindriques de béton (150 x 300 mm) sont réalisées à chaque livraison et testées en compression au moment des essais en laboratoire. La résistance en compression à 28 jours des bétons mis en œuvre est de 45 MPa.

3.5.3.2 Base granulaire

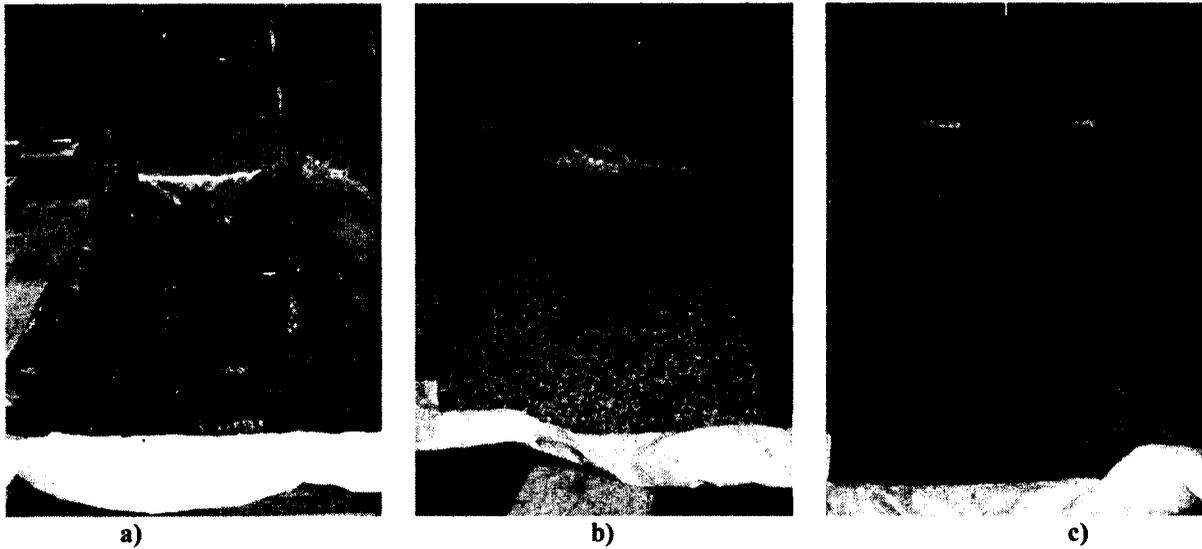
Le module de réaction du sol support prescrit par le MTQ pour les essais est $k = 110 \text{ MPa/m}$, représentant une fondation rigide sous chaussée comme montré sur le tableau suivant :

Tableau 3.23 : Modules de réaction du sol support dans la littérature

Référence	Type de sol	kN/m ³		
		Portance faible	Portance moyenne	Dense, bonne portance
[Terzaghi, 1955]	Humide, sableux	6,3 - 18,9 x 1000	18,9 - 94,3 x 1000	94,3 - 314,2 x 1000
[Miner et Seastone, 1955]	Sols granulaires			135 - 190 x 1000

La base granulaire est réalisée en trois 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. Le mélange granulaire est réalisé selon les spécifications de l'AASHTO (base classe A).

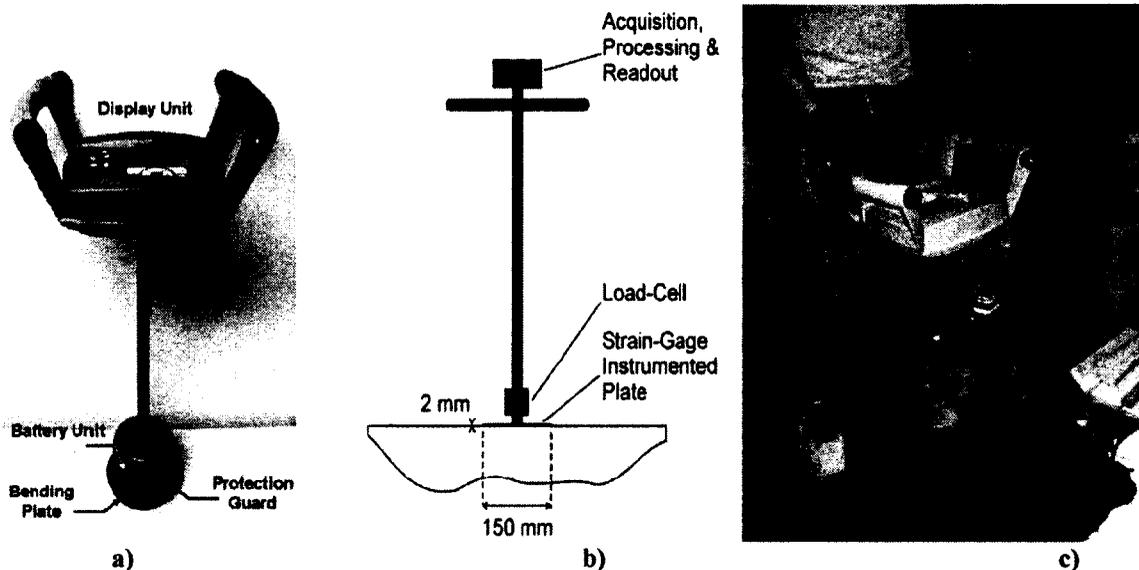
Il est obtenu en mélangeant 50% de sable (0-5), 20% de pierre concassée de 10 mm (5-14) et 30% de pierre concassée de 20 mm (14-28). Les granulats sont mouillés avant mise en place pour une compaction optimale. La base ainsi formée est caractéristique de la dernière couche d'assise de chaussée sous pavage rigide. Elle est placée dans un container réalisée avec des bastings 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 bâche en polyéthylène placée dans le fond contient le mélange et évite la dispersion des granulats dans le laboratoire :



Figures 3.73 : Container de la base granulaire

Une fois réalisée la base est recouverte d'une dernière couche de sable pour un meilleur contact avec la dalle. Cette dernière couche est remplacée et nivelée entre chaque essai.

Un appareil de contrôle de compaction a été utilisé pour vérifier le module de réaction du sol entre chaque essai. Fourni par la compagnie Roctest (Saint Lambert, Qc, Canada), cet outil *Briaud Compaction Device* (BCD) permet d'obtenir le module du sol par application d'une charge de 22,3 kg (50 livres) par l'opérateur comme montré sur les figures suivantes :



Figures 3.74 : appareil BCD de contrôle de compaction

3.5.3.3 Essais statiques

Afin de caractériser le transfert de charge par le système joint/goujons à l'état initial et après plusieurs séries de chargements jusqu'à 1 000 000 de cycles, E et LTE sont déterminés sous chargement monotonique aux valeurs de 40 (ECAS ½ essieu), 50 (charge légale), 80 et 100 kN. Des LVDT placés de part et d'autre du joint permettent de mesurer les déflexions de chaque dalle (figure 3.76). La charge est appliquée à l'aide d'une plaque circulaire de 304,8 mm (12 po) montée sur un vérin MTS d'une capacité de 1 000 kN. Les essais sont pilotés par déplacement contrôlé à un taux de 0,01 mm/sec pour permettre un chargement et un contact progressif de la dalle sur la base granulaire. Le montage en laboratoire est présenté sur les figures suivantes :



b)



b)

Figures 3.75 : Montage en laboratoire



Figure 3.76 : Mesure des déflexions de chaque dalle de part et d'autre de joint (LVDT)

L'acquisition des données est faite à l'aide d'un système VISHAY 5000, le traitement des données est fait à l'aide du logiciel FlexTest SE.

Pour les essais statiques initiaux, chaque dalle a été chargée jusqu'à 200 kN ($\gg 2ECAS$) puis déchargée et rechargée jusqu'à la rupture du spécimen pour caractériser la baisse de performance structural du système jointé après fissuration du béton.

3.5.3.4 Essais cycliques

Afin de caractériser le comportement structural des dalles goujonnées à très long terme, des essais de chargements cycliques ont été réalisés sur chacune des trois variantes du design proposé. Les dalles ont été soumises à 1 000 000 de cycles de chargement/déchargement et la performance du joint a été déterminée à différentes étapes par chargement monotone comme expliqué précédemment. Ces essais visent à mettre en évidence le comportement à la fatigue de la structure goujonnée (transfert de charge, fissuration autour du goujon à la face du joint, tassement de la base).

Lors du passage d'un camion entre 65 et 80 km/h, le chargement dû au passage de l'essieu s'effectue en 25 à 30 ms [MTQ, 2009], représentant une sinusoïde de chargement/déchargement d'une fréquence de 16 à 20 Hz.

Les spécimens ont été étudiés sous une fréquence de 15 Hz entre 10 et 50 kN par chargement contrôlé. La fréquence choisie permet de ne pas surestimer la performance de la structure (les fréquences plus basses accentuant les dégradations) et de correspondre à un taux de chargement typique des intersections à lourd trafic des zones périurbaines. La charge de départ de 10 kN permet de conserver un contact entre le vérin et la dalle durant les cycles et lors du tassement de la base granulaire. Une fois les 1 million de cycles achevés, les spécimens ont été testé sous chargement monotonique jusqu'à la rupture pour comparer la formation du réseau de fissuration avec celui des essais statiques.

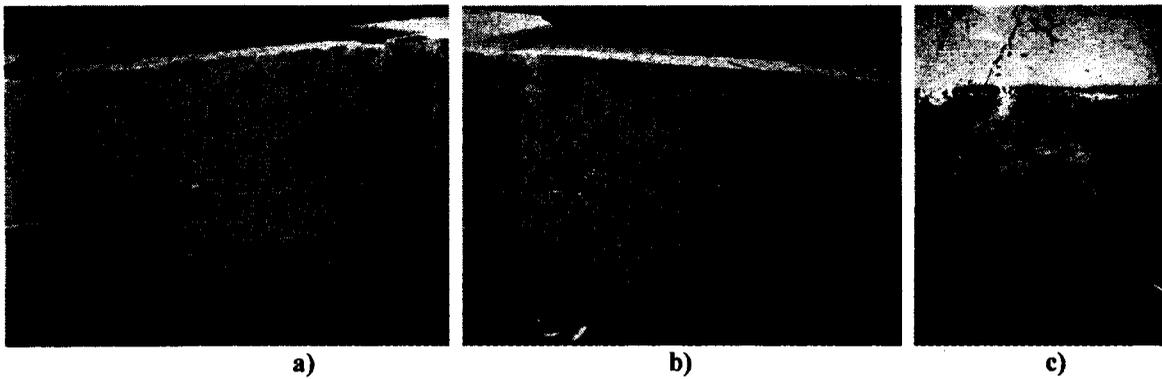
3.6 Résultats et analyse Phase III

3.6.1 Essais statiques

Chaque spécimen de dalle (28,6 mm ACIER, 34,9 et 38,1 mm PRFV) a été chargé jusque 200 kN, provoquant la fissuration du béton, puis déchargée et rechargée jusqu'à la rupture.

- Dalle de référence avec ACIER diam. 28,6 mm

Le premier chargement monotonique a provoqué la fissuration d'un côté de la dalle à 140,7 kN et du second côté à 197 kN. La fissure apparaît autour du goujon au niveau du joint et se propage en surface. Une seconde fissuration est observé au rechargement sous une charge de 380 kN, les fissures se propagent radialement depuis la zone d'interface goujons/joint jusqu'à la surface tout au long du rechargement jusqu'à la rupture par cisaillement du béton sous une charge de 506,6 kN (figures 3.77). En surface, les fissures se développent en diagonale depuis la mi-épaisseur de la dalle (position des goujons) jusqu'au point d'application de la charge. La rupture s'effectue au niveau de l'extrémité des goujons et de la zone d'application de la charge par la plaque. Aucune fissure n'est apparue sur la dalle déchargée au cours de l'essai.



Figures 3.77 : Fissuration de la dalle côté chargé a) bord 1, b) bord 2 et c) rupture en cisaillement

L'efficacité du joint (E) et le transfert de charge (LTE) en fonction de la charge, calculés au moyen de LVDT placées de part et d'autre du joint, sont présentés sur la figure 3.78 :

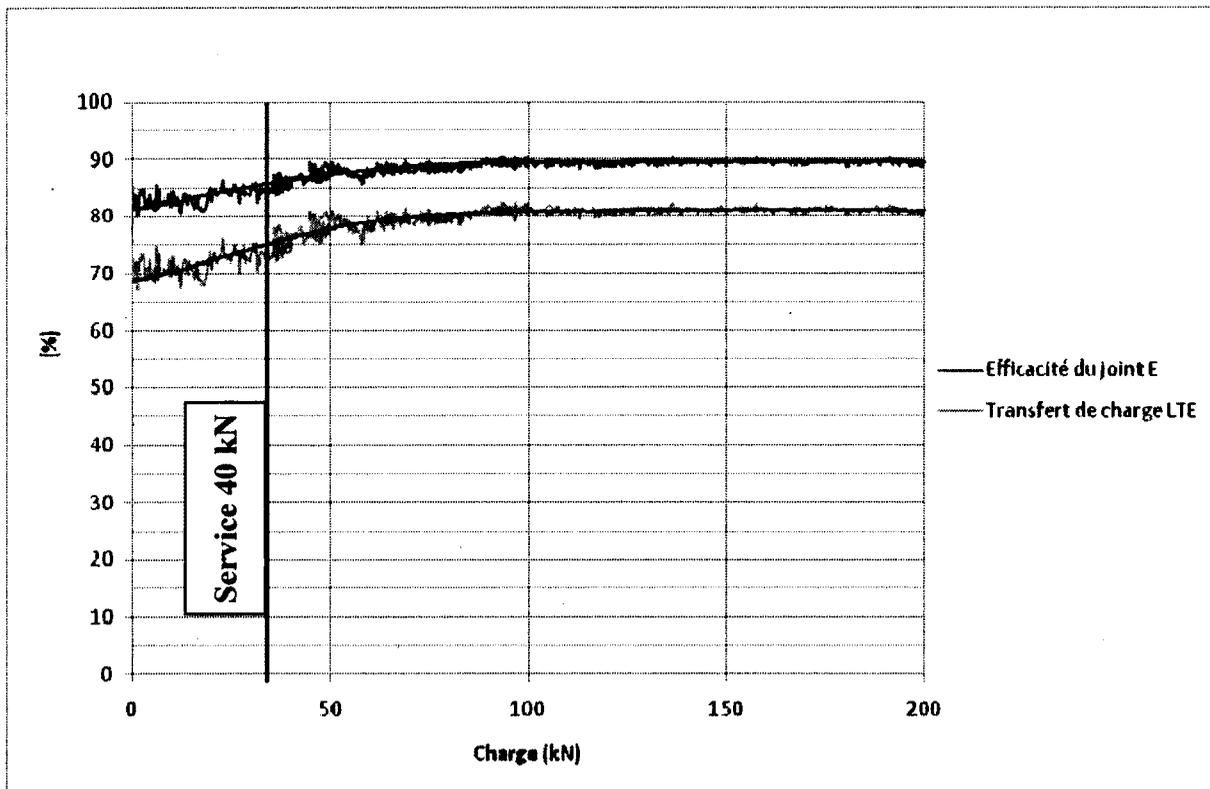


Figure 3.78 : Efficacité et transfert de charge sous chargement monotonique de la dalle ACIER de référence

Les résultats obtenus sont conformes aux recommandations de l'ACPA avec $E \gg 75\%$ et $LTE \gg 60\%$, le système joint/goujons satisfait aux critères structuraux et la rupture intervient par défaut du béton bien au delà des conditions d'utilisation de ces structures.

À 40 kN, valeur de l'ECAS d'un demi essieu, $E > 85\%$ et $LTE > 75\%$. On observe toutefois une performance structurale accrue pour des chargements supérieurs, le support sol étant plus sollicité et la déflexion des dalles plus importante, le transfert de charge est plus efficace.

La dalle n'ayant pas été coulée en place, un parfait contact entre la base et la dalle est plus difficile à obtenir en laboratoire, on peut donc admettre que le plateau des valeurs de E et LTE est représentatif du comportement réel en service de la structure.

Lors du rechargement, une fois le spécimen fissuré, on observe une baisse de 21% de l'efficacité du joint et de 30% du transfert de charge. Pour assurer une stabilité structurale, le pavage doit demeurer non fissuré au niveau du joint. Les premières fissurations apparaissant autour de 140 kN, la stabilité sous conditions de service n'est pas remise en cause.

La figure 3.79 montre l'évolution de la déflexion relative des dalles en fonction de la charge. On observe un plateau atteint à partir d'un chargement de 110 kN, ceci confirmant le meilleur transfert de charge observé pour E et LTE sous déflexions plus importantes.

La déflexion relative maximale est de l'ordre de 1 mm pour un tassement maximum de 5mm.

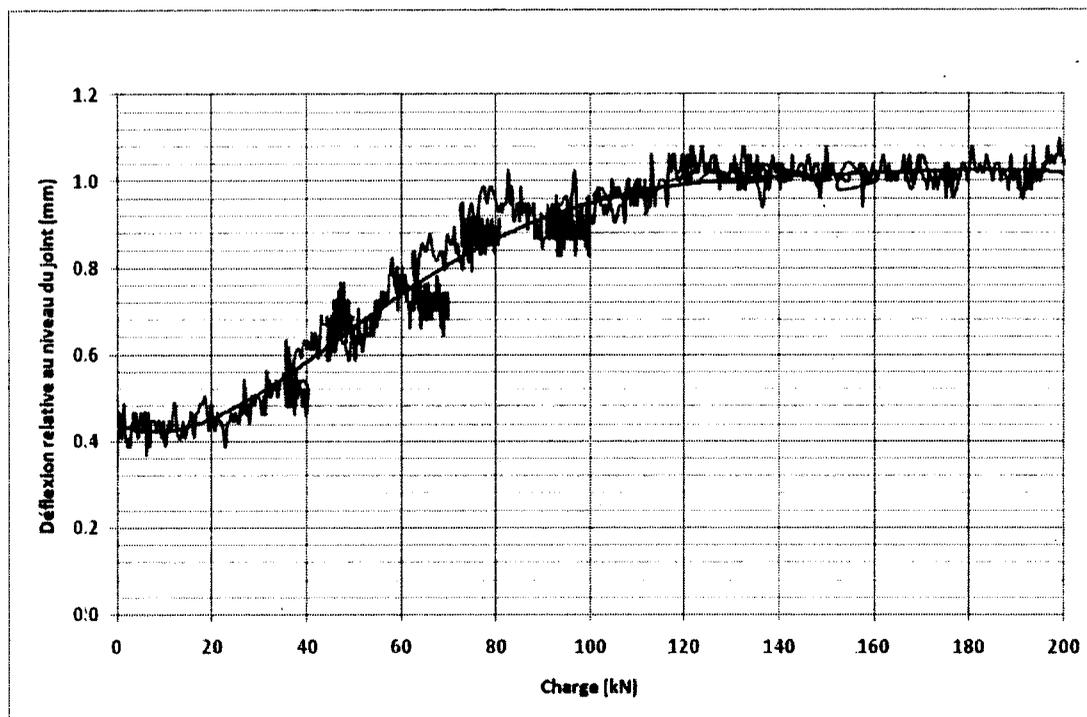


Figure 3.79 : Déflexion relative des dalles ACIER sous chargement monotonique

- **Dalle avec PRFV diam. 34,9 mm**

Le premier chargement monotonique a provoqué la fissuration de la dalle de chaque côté à 100 kN. Comme observé pour l'acier, la fissure apparaît autour du goujon au niveau du joint et se propage en surface.

Une seconde fissuration est observé au rechargement sous une charge de 200 kN, les fissures se propagent jusqu'à la rupture par cisaillement du béton sous une charge de 460 kN (figures 3.80). La rupture s'effectue au niveau de l'extrémité des goujons et de la zone d'application de la charge par la plaque. Aucune fissure n'est apparue sur la dalle déchargée au cours de l'essai.

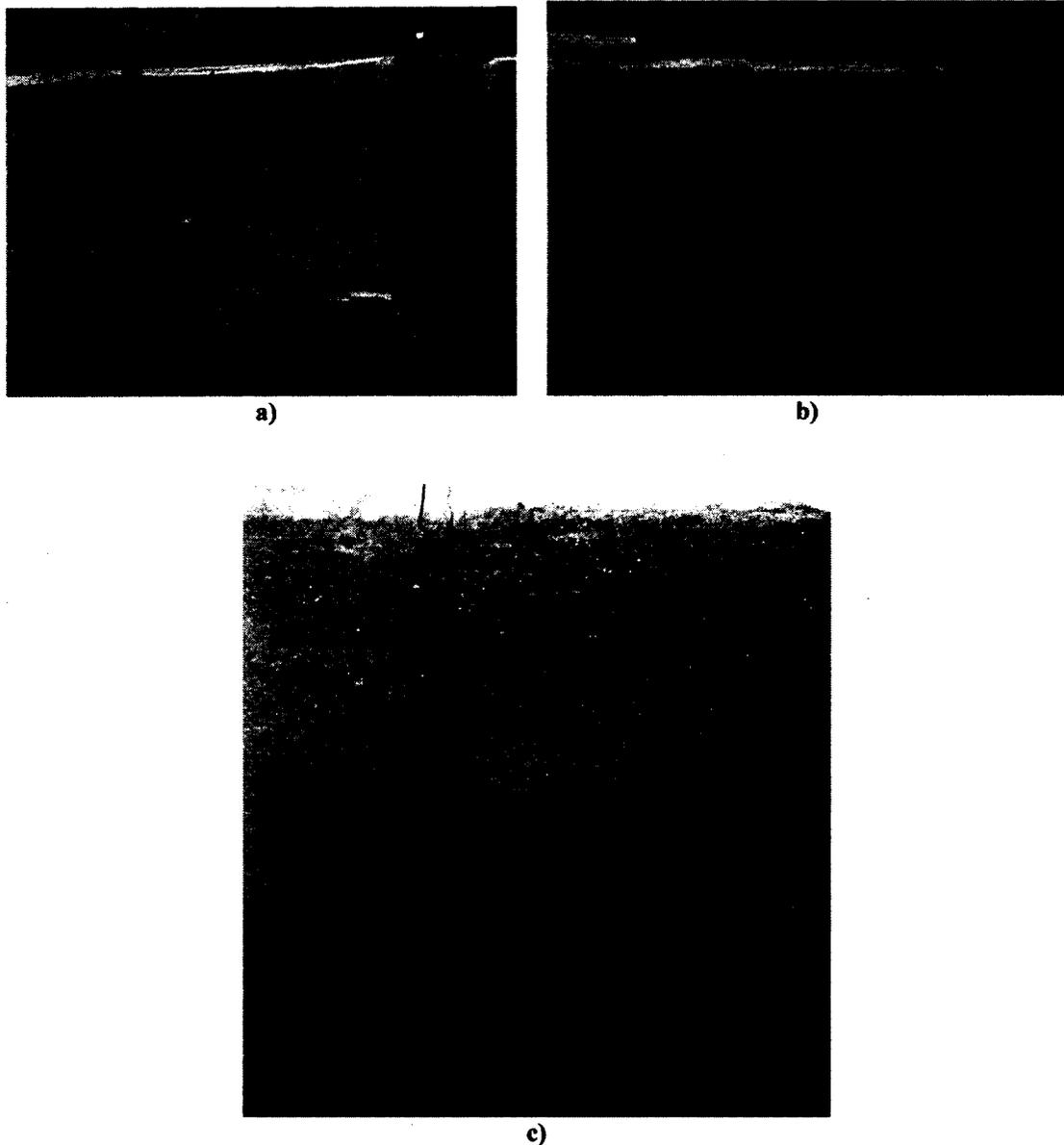


Figure 3.80 : Fissuration de la dalle côté chargé a) bord 1, b) bord 2 et c) rupture en cisaillement

L'efficacité du joint (E) et le transfert de charge (LTE) en fonction de la charge, calculés au moyen de LVDT placées de part et d'autre du joint, sont présentés sur la figure 3.81 :

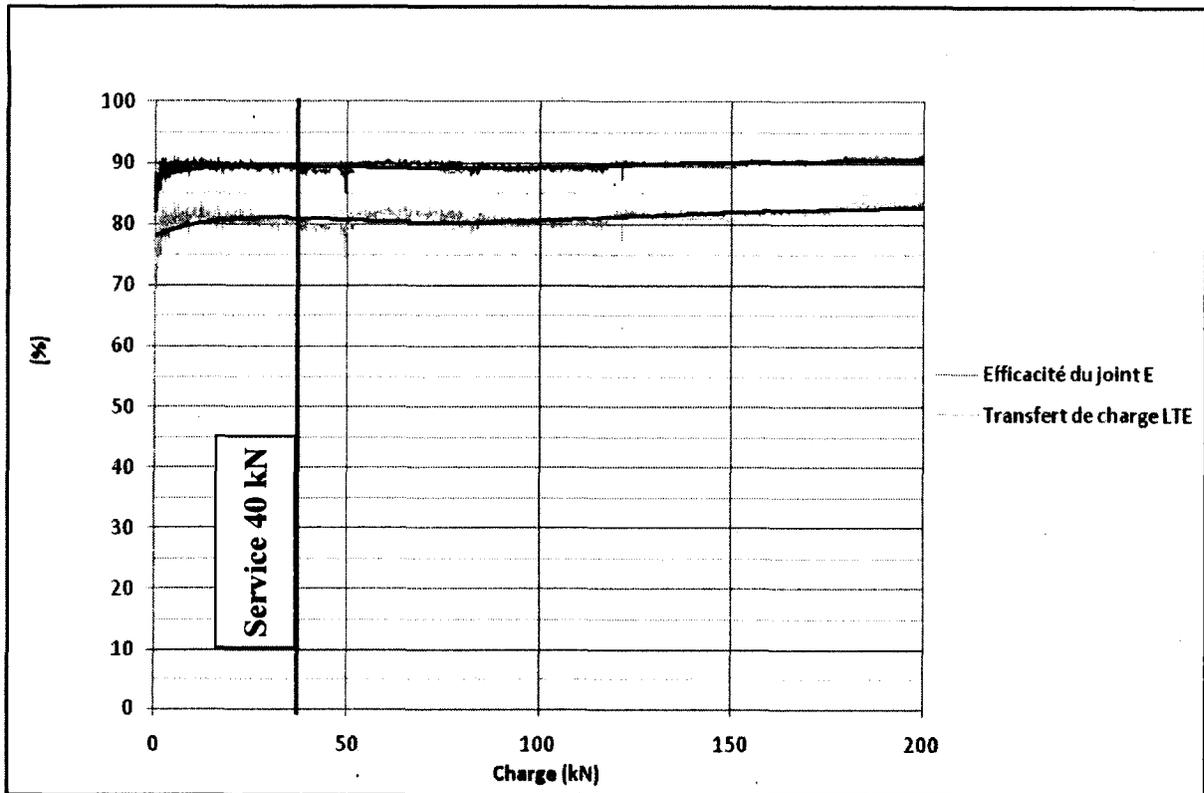


Figure 3.81 : Efficacité et transfert de charge sous chargement monotonique de la dalle PRFV 34,9 mm

Les résultats obtenus sont conformes aux recommandations avec $E \gg 75\%$ et $LTE \gg 60\%$, le système joint/goujons satisfait aux critères structuraux et la rupture intervient par défaut du béton bien au delà des conditions d'utilisation de ces structures.

À 40 kN, valeur de l'ECAS d'un demi essieu, $E=90\%$ et $LTE=80\%$, contrairement à la dalle de référence, E et LTE restent constant en fonction de la charge, probablement dû à la meilleure compaction du sol support et un meilleur contact après un premier essai. Ces observations devront être confirmées avec les essais de fatigue.

Lors du rechargement, une fois le spécimen fissuré, on observe une baisse de 25% de l'efficacité du joint et de 34% du transfert de charge. Pour assurer une stabilité structurale, le pavage doit demeurer non fissuré au niveau du joint. Les premières fissurations apparaissant autour de 100 kN, la stabilité sous conditions de service n'est pas remise en cause.

La figure 3.82 montre l'évolution de la déflexion relative des dalles en fonction de la charge. Ici aussi, on observe un plateau atteint à partir d'un chargement de 110 kN dû à la meilleure sollicitation des goujons sous fort chargement. La déflexion relative maximale est de l'ordre de 1,10 mm.

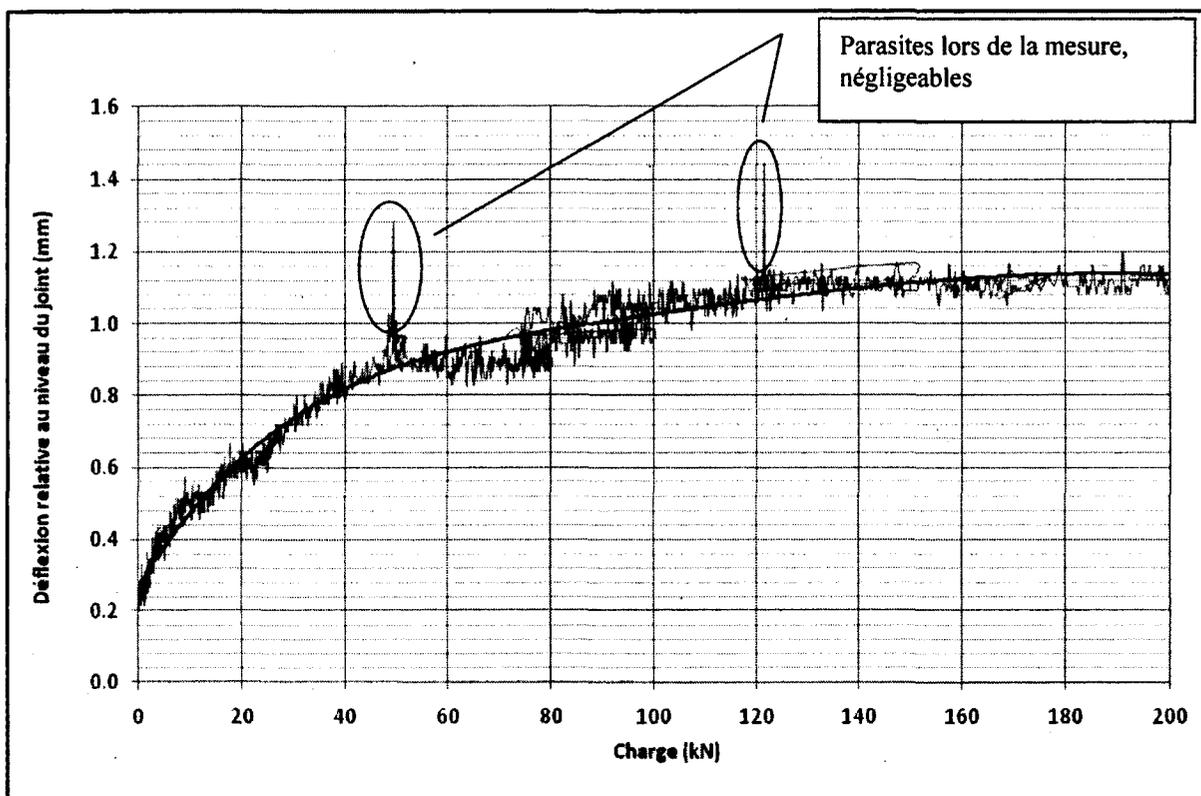
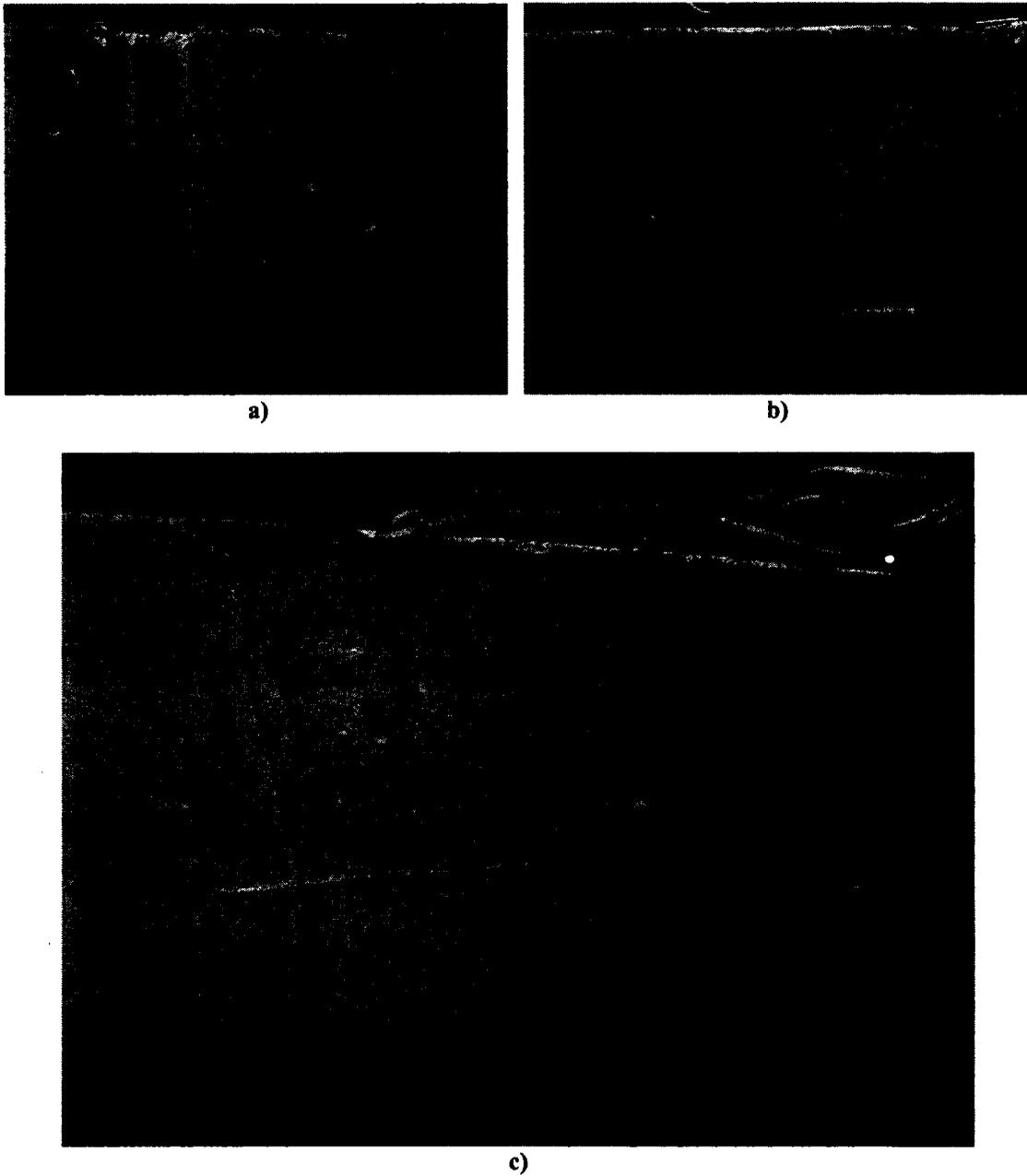


Figure 3.82 : Déflexion relative des dalles sous chargement monotone (PRFV 34,9 mm)

- **Dalle avec PRFV diam. 38,1 mm**

Le premier chargement monotone a provoqué la fissuration d'un côté de la dalle à 124,8 kN et le second côté à 154,7 kN. La fissure apparaît autour du goujon et se propage en surface. De nouvelles fissurations apparaissent au rechargement à 172 et 362,7 kN, le réseau de fissuration se développe comme observé pour les spécimens précédents, jusqu'à la rupture par cisaillement du béton sous une charge de 478 kN (figures 3.83). La rupture s'effectue au niveau de l'extrémité des goujons et de la zone d'application de la charge par la plaque. Aucune fissure n'est apparue sur la dalle déchargée au cours de l'essai.



Figures 3.83 : Fissuration de la dalle côté chargé a) bord 1, b) bord 2 et c) rupture en cisaillement

L'efficacité du joint (E) et le transfert de charge (LTE) en fonction de la charge, calculés au moyen de LVDT placées de part et d'autre du joint, sont présentés sur la figure 3.84 :

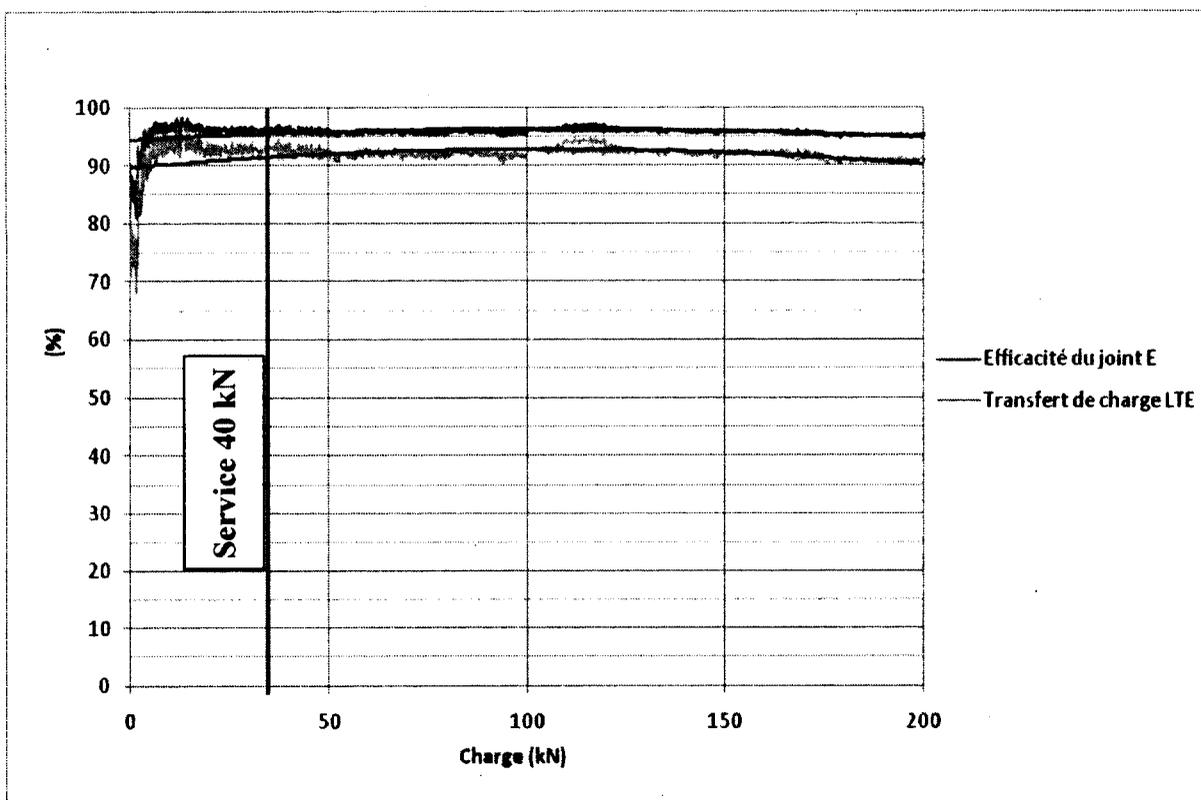


Figure 3.84 : Efficacité et transfert de charge sous chargement monotonique de la dalle PRFV 38,1 mm

Les résultats obtenus sont conformes aux recommandations avec $E >> 75\%$ et $LTE >> 60\%$, le système joint/goujons satisfait aux critères structuraux et la rupture intervient par défaut du béton bien au delà des conditions d'utilisation de ces structures. À 40 kN, valeur de l'ECAS d'un demi essieu, $E > 95\%$ et $LTE > 90\%$. La performance structurale demeure quasi-constante jusqu'à 200 kN.

Lors du rechargement, une fois le spécimen fissuré, on observe une baisse de 21% de l'efficacité du joint et de 33% du transfert de charge. Pour assurer une stabilité structurale, le pavage doit demeurer non fissuré au niveau du joint. Les premières fissurations apparaissant autour de 125 kN, la stabilité sous conditions de service n'est pas remise en cause.

La figure 3.85 montre l'évolution de la déflexion relative des dalles en fonction de la charge. La déflexion relative maximale est de l'ordre de 1 mm sous 200 kN de chargement.

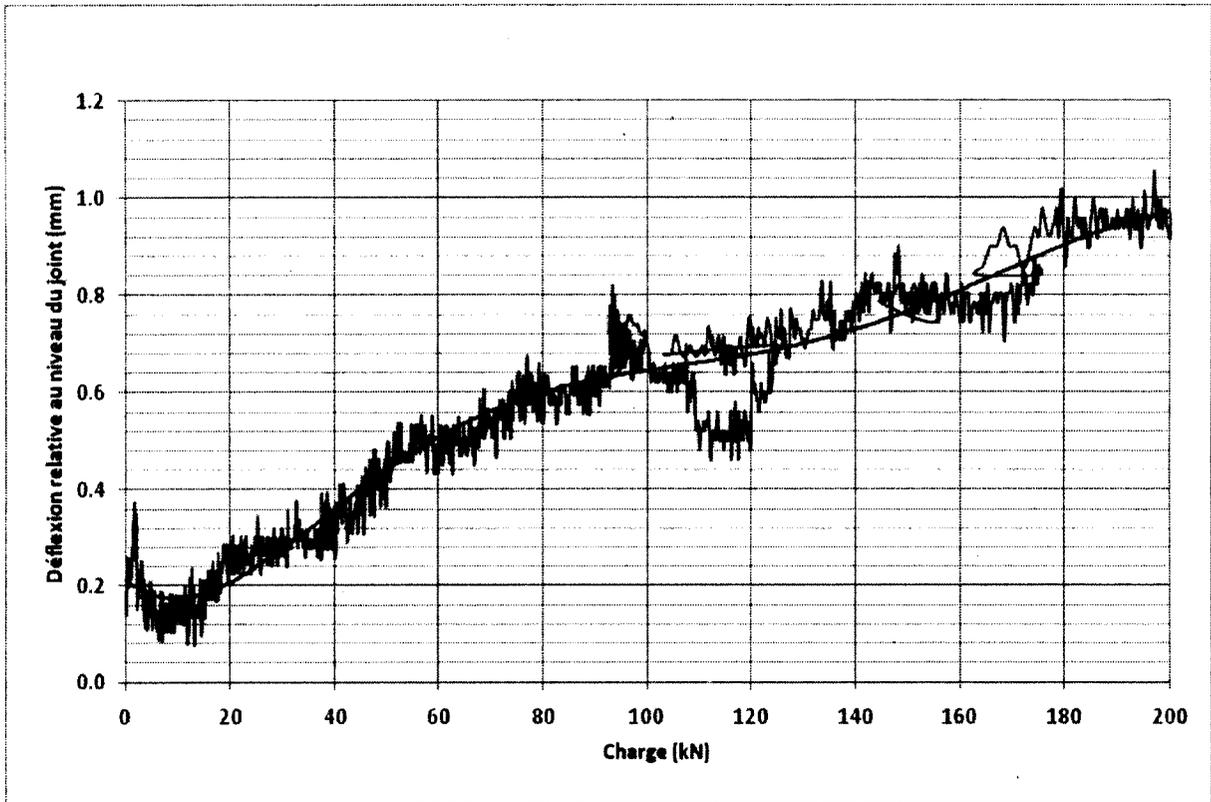


Figure 3.85 : Déflexion relative des dalles sous chargement monotonique (PRFV 38,1 mm)

- **Synthèse des essais statiques**

Les résultats présentés précédemment sont ici synthétisés pour comparaison.

Les tableaux 3.24 et 3.25 présentent la performance structurale des différents spécimens avant et après fissuration :

Tableau 3.24 : Efficacité structurale sous charge de service (40 kN)

	ACIER 28,6 mm		PRFV 34,9 mm		PRFV 38,1 mm	
	<i>E</i> (%)	<i>LTE</i> (%)	<i>E</i> (%)	<i>LTE</i> (%)	<i>E</i> (%)	<i>LTE</i> (%)
1 ^{er} chargement à 40 kN	86	75	89	81	95	92
Rechargement fissuré	65	45	64	47	74	59

Tableau 3.25 : Fissuration des spécimens

	ACIER 28,6 mm	PRFV 34,9 mm	PRFV 38,1 mm
Fissuration (kN)	140,7	100	124,8
Rupture (kN)	506,6	460	478

Comme évoqué précédemment, les dalles goujonnées doivent demeurer non fissurées pour un comportement structural optimal. Les premières fissurations se développant autour des goujons n'apparaissent qu'à partir de 100 kN, bien au-delà des conditions de service (40 kN pour ½ essieu).

Les valeurs du tableau 3.24 sont présentées graphiquement sur les figures suivantes :

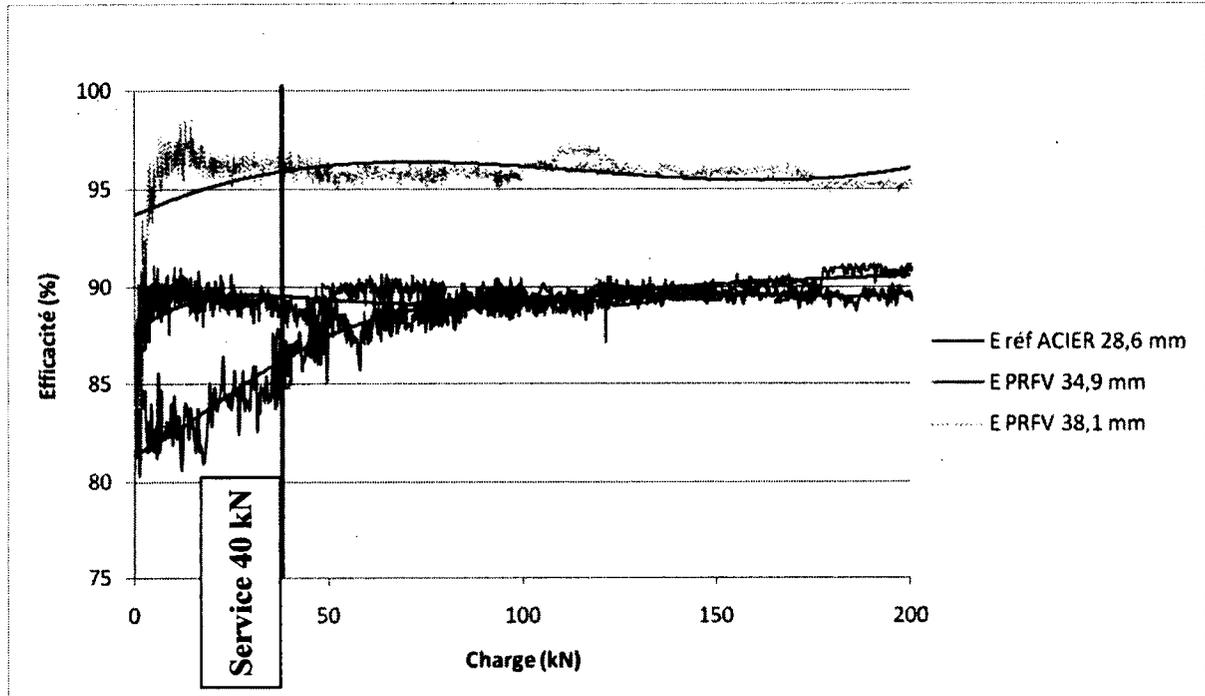


Figure 3.86 : Efficacité du joint sous chargement monotone des différentes dalles

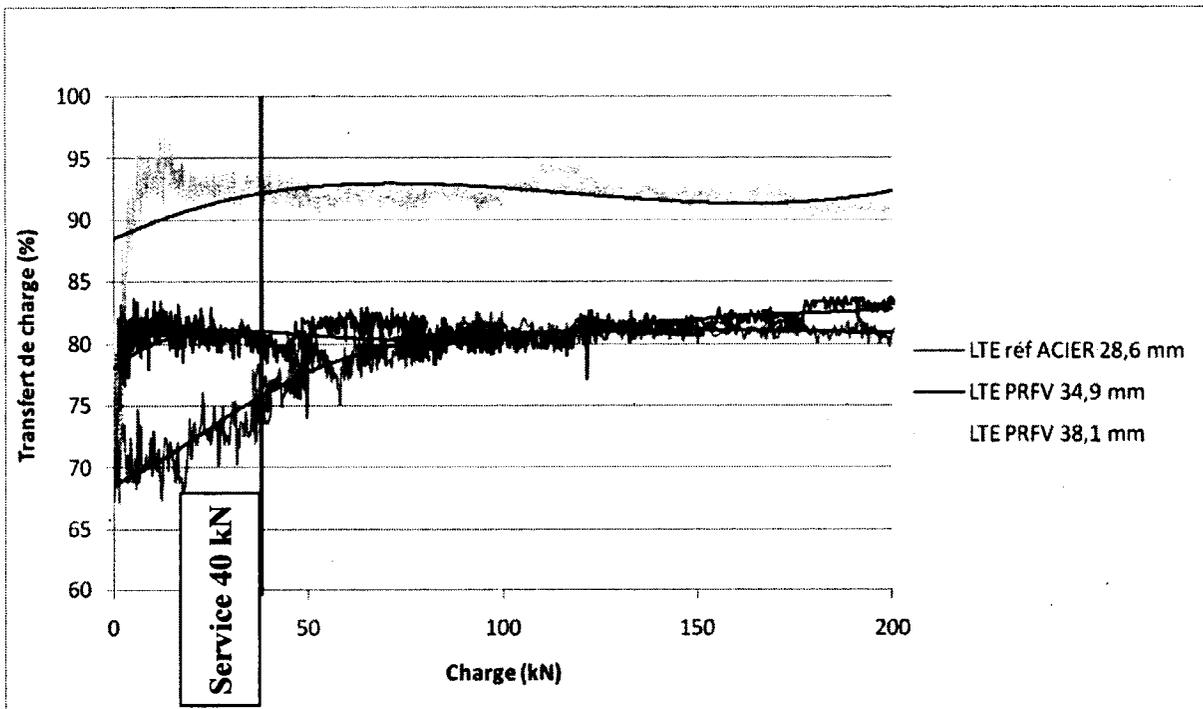


Figure 3.87 : Transfert de charge sous chargement monotonique des différentes dalles

Le comportement des dalles équipées avec des goujons d'acier de 28,6 mm et de PRFV de 34,9 mm de diamètre est équivalent. Néanmoins, comme montré sur la figure 3.88, la déflexion relative des dalles de PRFV est supérieure de 10%. Comme proposé dans la méthode de design, il peut être admis des déformations supplémentaires, tant que les contraintes limites dans le béton ne sont pas atteintes, sans obtenir une baisse de la performance structurale sous conditions de service du pavage. Les goujons de PRFV de 38,1 mm de diamètre confèrent au système des performances bien supérieures comme anticipé par

le design ($\frac{\sigma_{prfv}}{\sigma_{acier}} = 0,78$).

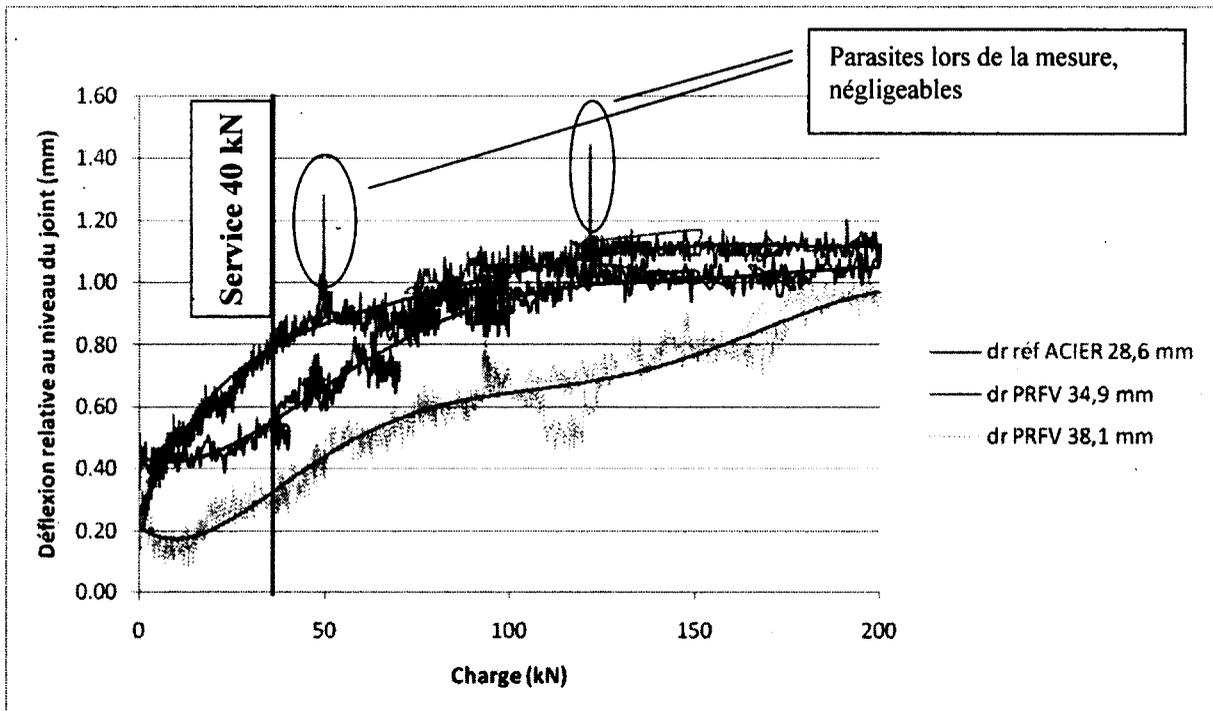


Figure 3.88 : Déflexion relative des différentes dalles sous chargement monotonique

La figure 3.89 présente les déflexions des dalles côté chargé en fonction de la charge pour chaque spécimen. Le tassement sous chargement de 200 kN est compris entre 6 et 10 mm dû au tassement progressif de la base et à la couche de contact plus meuble en sable rapportée entre chaque essai. On observe donc qu'une l'augmentation de quelques dixièmes de millimètre de la déflexion relative peut être acceptée face à la déflexion totale des dalles sans affecter le transfert de charge.

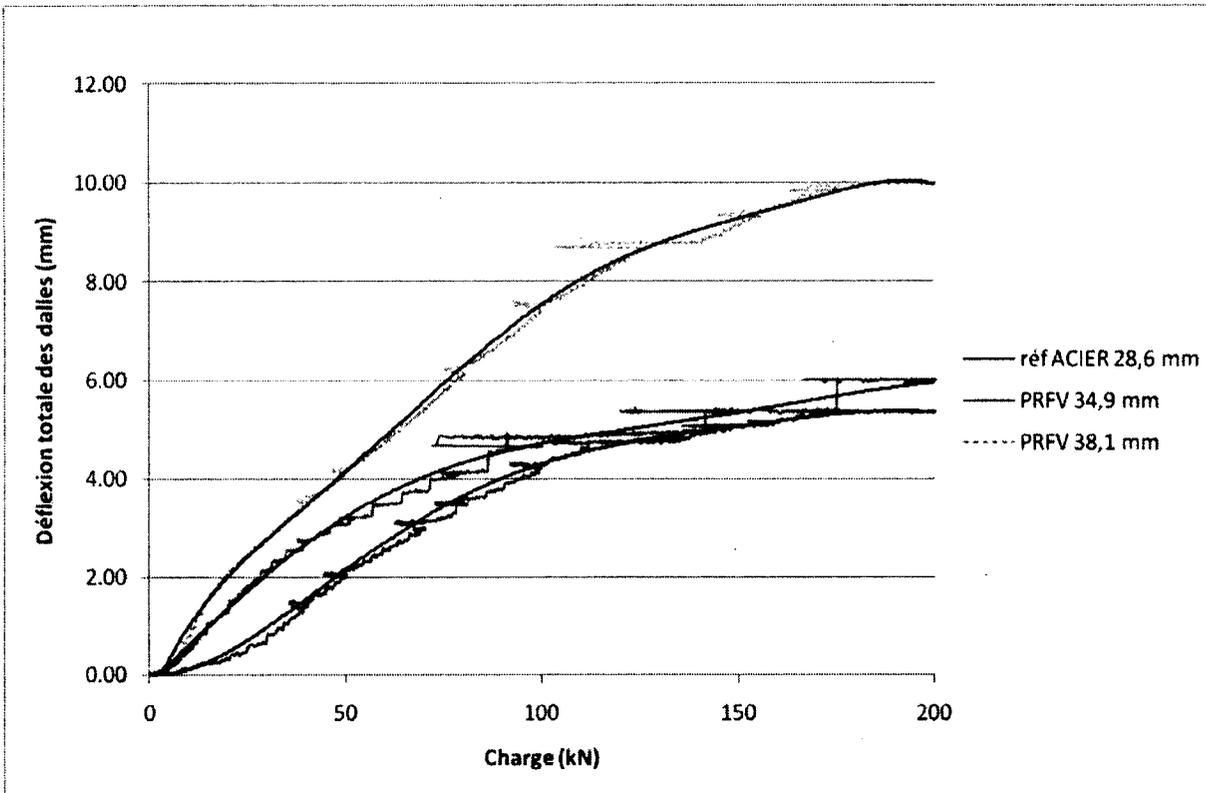
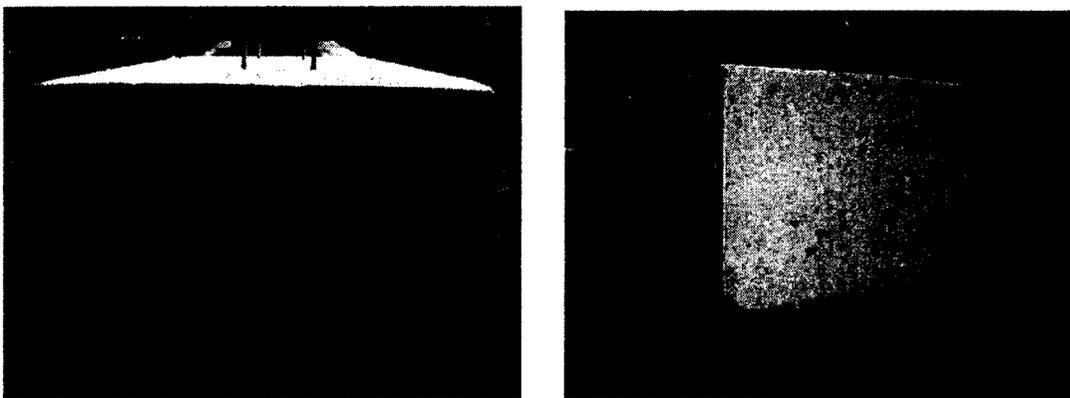


Figure 3.89 : Déflexion totale des dalles sous chargement monotonique (dalle côté chargé)

Les figures 3.90 montrent le soulèvement des spécimens aux extrémités au rechargement à 400 kN. Près de 1 cm de soulèvement sont constatés selon les essais caractérisant la forte pression avec le sol support au niveau du joint et expliquant les modes de rupture par cisaillement du béton.



Figures 3.90 : Soulèvement des extrémités des dalles sous chargement de 400 kN

3.6.2 Essais cycliques

Les essais cycliques réalisés jusqu'à 1 000 000 de cycles ont permis de caractériser la stabilité à la fatigue des différentes alternatives proposées et de valider les résultats obtenus initialement avec les essais statiques. Les figures 3.91 et 3.92 synthétisent les résultats d'efficacité du joint et de transfert de charge obtenus par chargement monotonique sous conditions de service (40 kN) entre chaque séquence de cycle (soit à 1, 1 000, 10 000, 100 000, 500 000 et 1 000 000 de cycles).

Les résultats en fin d'essais sont de 92% d'efficacité pour les dalles de référence acier et PRFV 34,9 mm, et de 96% pour les dalles équipées de PRFV 38,1 mm. Les transferts de charge sont de 83% pour les dalles de référence acier et PRFV 34,9 mm, et de 93% pour les dalles équipées de PRFV 38,1 mm.

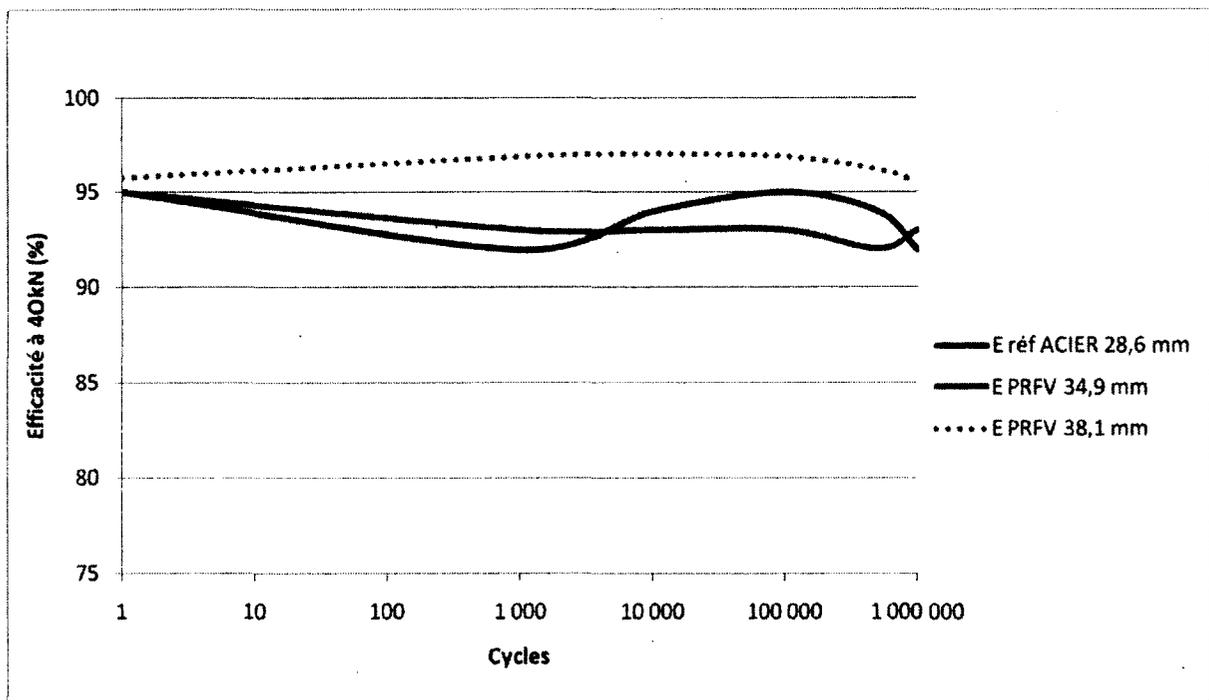


Figure 3.91 : Efficacité du joint à long terme des différentes dalles sous chargement réglementaire de 40 kN

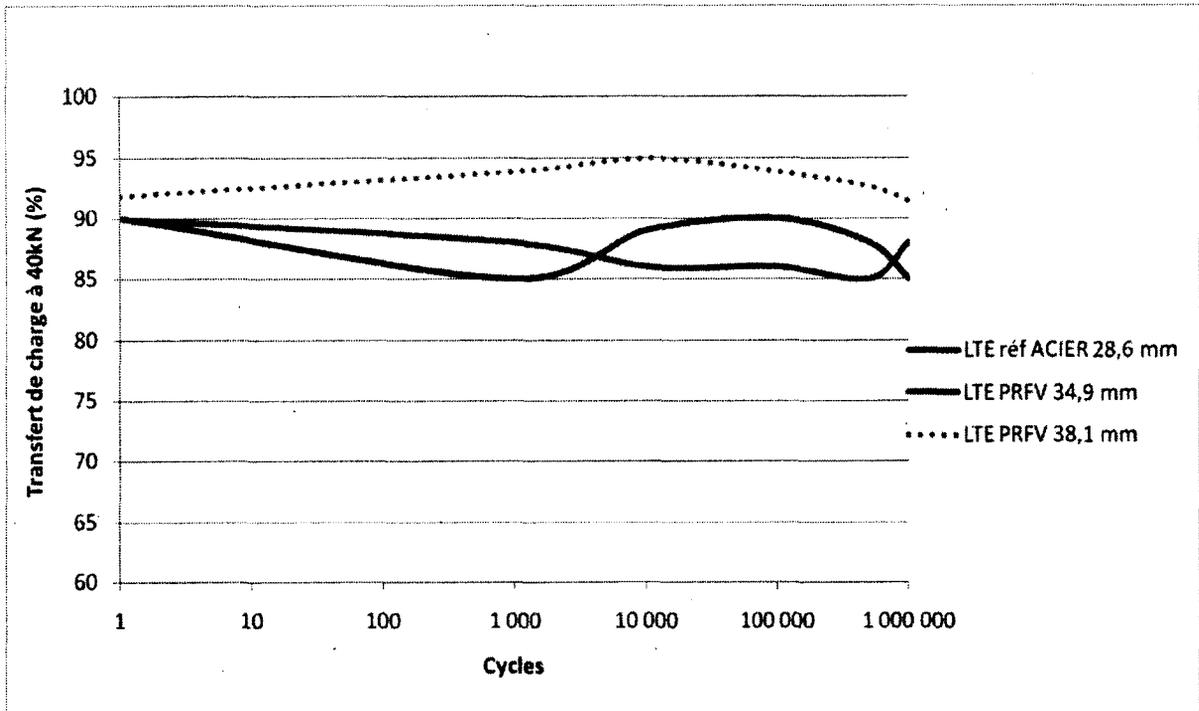
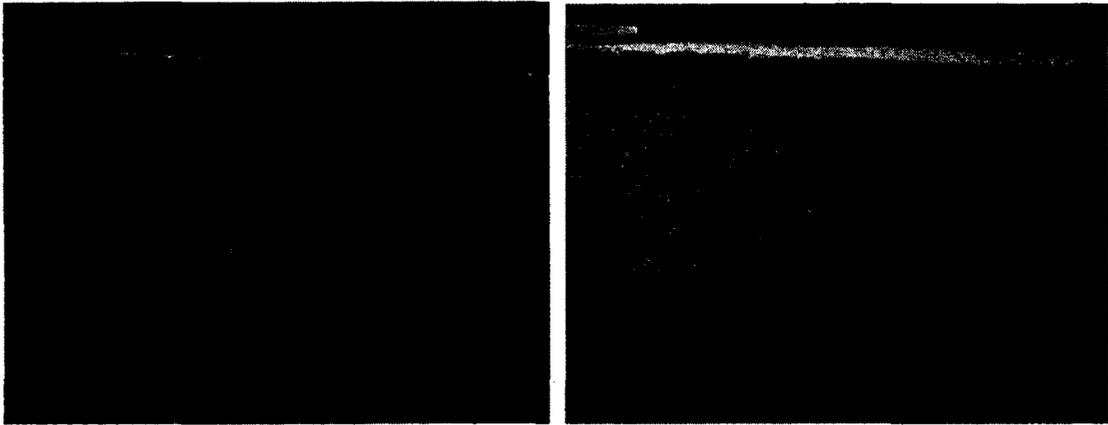


Figure 3.92 : Transfert de charge des différentes dalles sous chargement réglementaire de 40 kN

Les résultats sont comparables aux essais statiques initiaux sous fort chargement et montrent que l'alternative PRFV de 34,9 mm permet d'obtenir un comportement structural équivalent à long terme à celui de l'acier de référence 28,1 mm. Les goujons de PRFV de 38,1 mm offrent des performances bien supérieures en efficacité et transfert de charge.

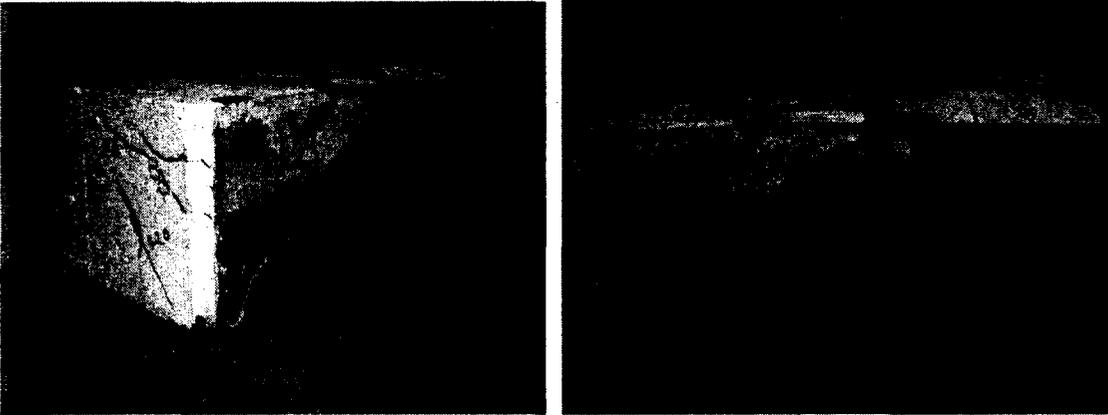
Les spécimens demeurant non fissurés et les charges appliquées restant bien en deçà de la résistance ultime des goujons ($<10\% P_u$), aucun phénomène de fatigue n'est caractérisé et les résultats satisfont amplement aux critères de $E > 75\%$ et $LTE > 60\%$.

Au terme des essais de fatigue, un chargement jusqu'à la rupture permis d'observer le développement du réseau de fissuration. Comme attendu, le développement des fissures s'effectue de manière radiale depuis les goujons jusqu'aux bords de la dalle. Les fissurations en surface se sont développées pour des chargements supérieurs aux essais initiaux, probablement dû à la réduction des contraintes d'adhérence goujon/béton après les cycles :



a)

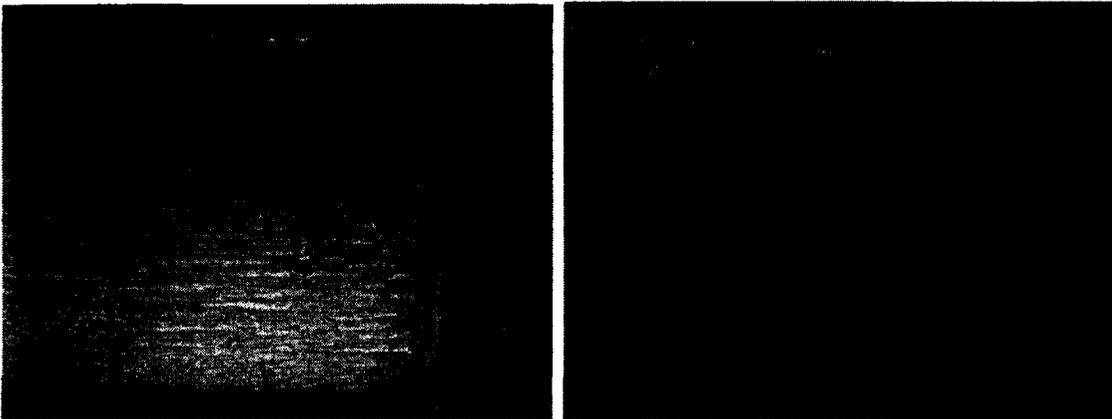
b)



c)

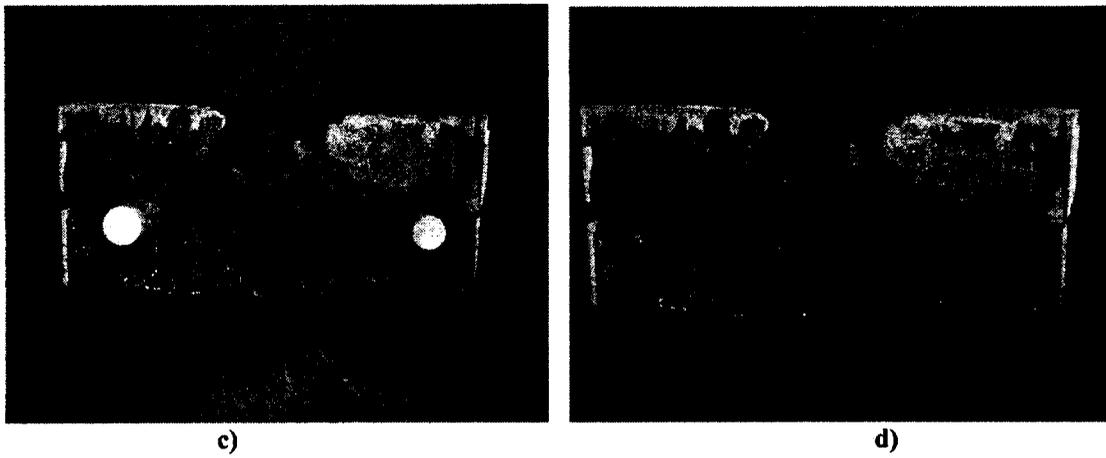
d)

Figures 3.93 : Réseau de fissuration à la rupture après 1 million de cycles (dalle acier 28,6 mm)



a)

b)



Figures 3.94 : Réseau de fissuration à la rupture après 1 million de cycles (dalle PRFV 34,9 mm)

Concernant la dalle équipée de goujons de PRFV 38,1 mm, une seule fissure est apparue autour de 150 kN, puis plus aucun développement n'a été observé jusqu'à la rupture comme montré sur les figures 3.95 :

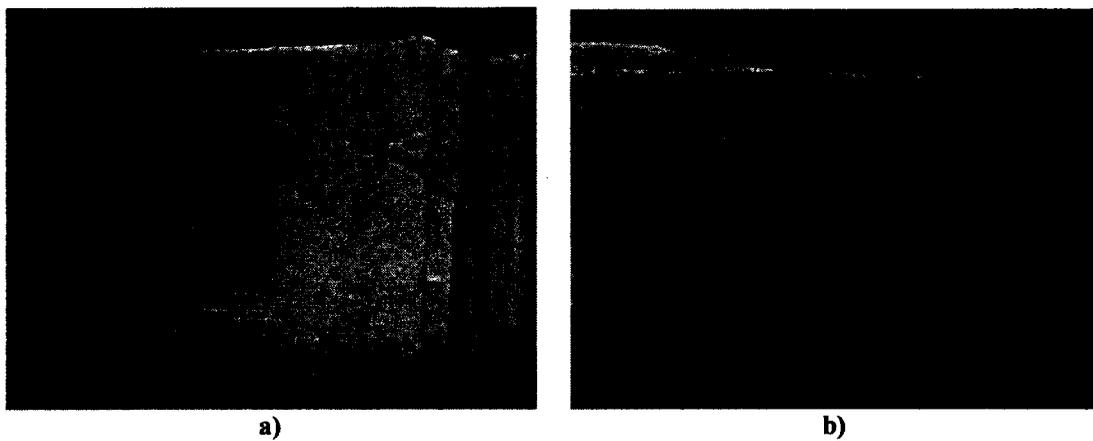


Figure 3.95 : Réseau de fissuration à la rupture après 1 million de cycles (dalle PRFV 38,1 mm)

Tableau 3.26 : Efficacité structurale sous charge de service (40 kN)

	ACIER 28,6 mm		PRFV 34,9 mm		PRFV 38,1 mm	
	<i>E</i> (%)	<i>LTE</i> (%)	<i>E</i> (%)	<i>LTE</i> (%)	<i>E</i> (%)	<i>LTE</i> (%)
1 ^{er} chargement à 40 kN	95	90	95	90	96	92
1 000 000 de cycles	92	85	93	87	95	91

Tableau 3.27 : Fissuration des spécimens

	ACIER 28,6 mm	PRFV 34,9 mm	PRFV 38,1 mm
Fissuration (kN)	250	178	145
Rupture (kN)	622	526	413

L'inspection visuelle des goujons après les essais n'a permis d'observer aucune dégradation des différents goujons ni de l'interface goujon/béton.

Les jauges placées sur les goujons ont enregistré des microdéformations inférieures à 3% et 5% pour l'acier et les goujons de PRFV respectivement.

Synthèse des essais de fatigue

Les goujons de PRFV de 34,9 mm sont une alternative de performance égale à ceux d'acier de 28,6 mm bien au delà des conditions de service, jusqu'à la rupture des spécimens. Le critère de dimensionnement de $1/8^{\text{ème}}$ x l'épaisseur du pavage étant déterminant pour l'emploi de goujon en acier, il n'est pas nécessaire de réviser l'épaisseur de la dalle avec l'emploi de goujons en PRFV de diamètre supérieur. De plus l'augmentation du diamètre permet de réduire les contraintes radiales et d'adhérence développées dans le béton.

Quelque soit l'alternative, aucune fissuration n'affectant la performance structurale du pavage ne s'est développée jusqu'à trois fois la charge de service.

Ces essais confirment le principe de la méthode de design proposée, reposant sur le critère de limitation des contraintes développées autour des goujons, tout en acceptant une déformation relative des dalles supérieures. Le calcul théorique de la déflexion relative des dalles est très difficile à confirmer ou infirmer expérimentalement, dû à la multiplicité des facteurs entrant en

ligne de compte (paramètres du sol, du système goujon/béton). Se basant sur la validité de la méthode de design face au critère de limitation des contraintes, on peut ainsi proposer les alternatives suivantes pour un même espacement de 12 po (ou 300 mm) :

- alternative acier 28,6 mm => PRFV 34,9 mm $\frac{\sigma_b}{\sigma_a} = 0,92$

- alternative acier 31,8 mm => PRFV 38,1 mm $\frac{\sigma_b}{\sigma_a} = 0,95$

- alternative acier 34,9 mm => PRFV 41,3 mm $\frac{\sigma_b}{\sigma_a} = 0,97$

Chapitre 4 Conclusions

Sommaire

L'objectif général de ce projet de recherche visait à caractériser les performances de goujons de PRFV en vinylester et polyester, en vue de proposer une alternative sans corrosion à ceux d'acier équipant les dalles de chaussée jointées. Trois phases de recherche ont composé cette étude permettant d'évaluer les performances des produits dans les principales conditions de service.

Ainsi une première phase permet de caractériser les propriétés mécaniques et physiques des goujons à destination de l'industrie, du MTQ et fournissant les données nécessaires au design. Il ressort de cette phase que les goujons satisfont au seul critère structural de 150 MPa de résistance au cisaillement direct (150 à 200 MPa obtenus). Pour tous les essais mécaniques, les goujons de polyester ont présenté des résistances inférieures de 20 à 30% à ceux de vinylester, la qualité et la performance de l'interface est moindre comme observé sur les coupes au microscope.

Les goujons manufacturés avec une résine vinylester présentent des propriétés physiques correspondantes au critère de haute durabilité D1 donné par le code CSA S807. Hormis le taux d'absorption d'eau, les goujons de polyester satisfont au critère de durabilité D2 des résines polyester.

La seconde phase du projet permet d'évaluer la durabilité des goujons sous différentes conditions simulant le contexte d'exploitation en service des chaussées. Trois cent cycles de gel/dégel n'ont affecté les performances de l'interface (cisaillement interlaminaire) que de l'ordre de 15% pour les goujons de polyester. Les goujons de vinylester ne sont pas affectés par l'essai.

Les essais de résistance chimiques ont démontré que seul un environnement extrêmement alcalin à haute diffusivité des ions hydroxydes pouvait entraîner une hydrolyse de la matrice, une dégradation de l'interface et des pertes de propriétés physiques conséquentes. Les autres

types de solutions n'entraînent qu'un effet de plastification et les baisses de performances mécaniques sont moindres.

Aucun effet de diamètre n'a été constaté sur les pertes mécaniques occasionnées.

Les essais de vieillissements accélérés ont prouvé la parfaite intégrité à long terme des goujons de vinylester qui présentent une stabilité de plus de 90% pour une durée de service extrapolée de 200 ans. Les propriétés physiques demeurent équivalentes jusqu'à la fin de la période de vieillissement. Les goujons de polyester ont subi des pertes de propriétés mécaniques et physiques plus conséquentes permettant de prédire une intégrité de 60% à la flexion et 80% au cisaillement direct au terme d'une période de service de 30 ans.

Enfin, le volet structural de l'étude permet de proposer une méthode de design et d'évaluer la performance structurale de spécimens de dalles jointées équipées de goujons d'acier et de PRFV. Ainsi les résultats obtenus bien au-delà des conditions des chargements de service et après un million de cycles de chargement/déchargement à 50 kN permettent de garantir la performance structurale du système goujonné en PRFV.

Les goujons de PRFV de 34,9 mm offrent des performances égales à celles de l'acier de 28,6 mm et limitent le développement des fissures au-delà du chargement règlementaire. Se basant sur l'équivalence des contraintes développées au sein du béton autour des goujons, les alternatives suivantes peuvent être proposées pour des applications de terrain :

- alternative acier 28,6 mm => PRFV 34,9 mm $\frac{\sigma_b}{\sigma_a} = 0,92$
- alternative acier 31,8 mm => PRFV 38,1 mm $\frac{\sigma_b}{\sigma_a} = 0,95$
- alternative acier 34,9 mm => PRFV 41,3 mm $\frac{\sigma_b}{\sigma_a} = 0,97$

Ces alternatives sont proposées avec les paramètres retenus dans la section 3.5.2.1 *Exemple de conception*. Si des paramètres différents sont choisis, il convient de corriger les paramètres de conception en suivant la procédure proposée à la section 3.5.2 *Conception*.

Contributions

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre du projet de recherche constitue une base de données considérable sur toute une gamme de produits.

Ainsi les différentes caractérisations effectuées permettent aux décideurs et gestionnaires d'infrastructures de considérer l'alternative PRFV pour de futurs projets.

Le MTQ dispose désormais de toutes les certifications et recommandations concernant ses produits et l'évaluation de leur durabilité lui permettant d'envisager de futurs projets routiers équipés de goujons de PRFV.

Ce projet de recherche a permis de contribuer à la rédaction de plusieurs publications scientifiques et apporte à la littérature des données encore peu investiguées (vieillissement accéléré à long terme, évaluation de la résine polyester).

Travaux futurs

Les recommandations suivantes peuvent être formulées, au terme du projet de recherche, quant aux futurs travaux qu'il serait intéressant d'entreprendre :

➤ Propriétés mécaniques et physiques

Le plus fort taux d'absorption de la résine polyester pourrait être caractérisé de manière plus approfondie. Le taux de diffusion de l'absorption au cours du temps et à différentes températures pourrait apporter des informations supplémentaires sur la cinétique d'absorption et des essais de caractérisation de la connectivité des pores pourraient être multipliés (différentes solutions pénétrantes, observation microscopiques).

Il serait intéressant de caractériser la résistance mécanique des goujons à très basses températures pour information, sachant que les autres barres de composites présentent une excellente durabilité dans ces conditions.

➤ Durabilité

Afin de fournir des données de prédictions encore plus précises, des essais de vieillissement à très long terme pourraient être conduits (1 à 2 ans) en multipliant les durées et températures de conditionnement, permettant :

- De caractériser avec plus de précision la dégradation des goujons de polyester durant la période de service ;
- De confirmer la stabilité à très long terme des goujons de vinylester et de s'assurer que la diffusion de la solution dans les goujons n'entraîne pas de plus fortes dégradations in fine.

➤ Comportement structural

Les spécimens jointés testés ayant présenté d'excellent résultats sous conditions de service à long terme et demeurant non fissuré, une continuité du projet de recherche va être entreprise en testant de nouveaux spécimens sous une amplitude de chargement/déchargement plus grande pour déterminer les limites structurales du système.

Tous les spécimens ayant développé leur réseau de fissuration au-delà de 100 kN, il serait intéressant de tester les nouveaux spécimens jusqu'à 80 kN (2 fois la charge légale).

La réduction de la fréquence des cycles pourrait aussi être envisagée pour accroître le phénomène de fatigue.

Dans le cadre d'un futur projet de recherche, il serait important de préciser la méthode de design et de confronter les résultats expérimentaux et théoriques, complété par exemple d'une analyse numérique. La multiplication des paramètres (sol, béton, espacement, diamètre, épaisseur du joint) permettrait de proposer de nouveaux facteurs de correction ou équations pour le design des structures jointées.

Annexe

Ensemble des résultats d'essais de durabilité (phase II)

Essai de gel/dégel - Cisaillement Direct									
résine	d (mm)	Tu ini (MPa)	conditionnement	Tu 90j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%Tu à 90j
vinylester	25.4	167.49	<i>air</i>	172.88	3.00	1.74	1.34	0.78	103.22
			<i>saturé dans l'eau</i>	173.28	2.65	1.53	1.19	0.69	103.46
			<i>béton saturé</i>	170.67	2.31	1.35	1.03	0.60	101.90
polyester	25.4	153.58	<i>air</i>	144.29	1.17	0.81	0.52	0.30	93.95
			<i>saturé dans l'eau</i>	139.76	1.06	0.76	0.47	0.33	91.00
			<i>béton saturé</i>	148.87	2.10	1.41	0.94	0.63	96.93

Essai de gel/dégel - Cisaillement Interlaminaire									
résine	d (mm)	Tu ini (MPa)	conditionnement	Tu 90j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%Tu à 90j
vinylester	25.4	53.24	<i>air</i>	53.91	1.26	2.34	0.56	1.04	101.25
			<i>saturé dans l'eau</i>	54.76	1.11	2.03	0.50	0.91	102.85
			<i>béton saturé</i>	52.94	3.42	6.46	1.53	2.89	99.43
polyester	25.4	39.07	<i>air</i>	33.15	1.74	5.25	0.78	2.35	84.85
			<i>saturé dans l'eau</i>	33.86	1.08	3.19	0.48	1.42	86.66
			<i>béton saturé</i>	34.18	1.66	4.86	0.74	2.17	87.48

Essais de Résistance Chimique - Cisaillement Interlaminaire									
résine	d (mm)	Tu ini (MPa)	solution	Tu 90j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%Tu ini
vinylester	25.4	53.24	Aqueduc	54.55	1.06	1.95	0.43	0.80	102.46
			NaOH 3%	51.47	1.34	2.60	0.55	1.06	96.66
			Ca(OH)2 sat	52.47	2.57	4.91	1.05	2.00	98.54
			CaCl2 3%	53.34	1.46	2.73	0.60	1.12	100.18
	28.6	59.91	Aqueduc	60.94	1.79	2.93	0.73	1.20	101.73
			NaOH 3%	57.36	1.56	2.72	0.64	1.11	95.75
			Ca(OH)2 sat	58.69	1.88	3.21	0.77	1.31	97.97
			CaCl2 3%	60.41	2.11	3.49	0.86	1.42	100.85
	31.8	60.14	Aqueduc	61.53	1.49	2.43	0.61	0.99	102.31
			NaOH 3%	57.77	2.73	4.73	1.12	1.93	96.06
			Ca(OH)2 sat	58.84	2.15	3.65	0.88	1.49	97.83
			CaCl2 3%	61.14	1.07	1.76	0.44	0.72	101.67
	34.9	61.09	Aqueduc	60.63	0.35	0.57	0.14	0.23	99.24
			NaOH 3%	57.59	1.48	2.58	0.61	1.05	94.27
			Ca(OH)2 sat	59.16	1.88	3.18	0.77	1.30	96.83
			CaCl2 3%	60.75	2.05	3.37	0.84	1.38	99.44
	38.1	53.97	Aqueduc	53.83	1.65	3.07	0.67	1.25	99.73
			NaOH 3%	51.36	0.96	1.87	0.39	0.76	95.17
			Ca(OH)2 sat	52.50	0.76	1.45	0.31	0.59	97.27
			CaCl2 3%	54.24	1.02	1.88	0.42	0.77	100.50
	41.3	58.33	Aqueduc	58.10	0.57	0.98	0.23	0.40	99.62
			NaOH 3%	55.10	1.53	2.78	0.63	1.14	94.46
			Ca(OH)2 sat	56.37	1.14	2.02	0.47	0.82	96.64
			CaCl2 3%	57.94	2.07	3.57	0.84	1.46	99.33
	44.5	60.20	Aqueduc	59.84	0.97	1.63	0.40	0.66	99.41
			NaOH 3%	56.94	1.36	2.38	0.55	0.97	94.59
			Ca(OH)2 sat	58.54	2.73	4.66	1.11	1.90	97.25
			CaCl2 3%	60.14	1.28	2.12	0.52	0.87	99.91
polyester	25.4	39.07	Aqueduc	34.20	0.83	2.42	0.34	0.99	87.54
			NaOH 3%	25.74	0.98	3.79	0.40	1.55	65.88
			Ca(OH)2 sat	33.45	1.12	3.36	0.46	1.37	85.61
			CaCl2 3%	33.23	0.53	1.59	0.22	0.65	85.05
	28.6	34.76	Aqueduc	30.63	1.33	4.34	0.54	1.77	88.12
			NaOH 3%	23.21	0.72	3.09	0.29	1.26	66.78
			Ca(OH)2 sat	29.65	2.33	7.85	0.95	3.21	85.31
			CaCl2 3%	29.73	1.91	6.41	0.78	2.62	85.54
	31.8	40.14	Aqueduc	34.53	1.06	3.08	0.43	1.26	86.04
			NaOH 3%	27.62	0.95	3.42	0.39	1.40	68.81
			Ca(OH)2 sat	32.81	1.51	4.60	0.62	1.88	81.75
			CaCl2 3%	33.58	2.14	6.39	0.88	2.61	83.66
	34.9	36.67	Aqueduc	32.09	1.62	5.05	0.66	2.06	87.51
			NaOH 3%	24.31	1.48	6.09	0.60	2.48	66.31
			Ca(OH)2 sat	31.93	1.12	3.50	0.46	1.43	87.09
			CaCl2 3%	32.90	1.01	3.08	0.41	1.26	89.72

Essai de Vieillissement Accéléré - Cisaillement Direct									
résine	d (mm)	Tu ini (MPa)	T°C	Tu 30j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%Tu à 30j
vinylester	25.4	167.49	25	169.17	4.97	2.94	2.49	1.47	101.00
			50	164.97	2.54	1.54	1.27	0.77	98.50
			60	159.96	3.56	2.23	1.78	1.11	95.50
	28.6	193.98	25	194.08	3.12	1.61	1.56	0.80	100.05
			50	190.98	2.12	1.11	1.06	0.56	98.45
			60	188.32	4.45	2.36	2.23	1.18	97.08
	31.8	160.29	25	160.12	4.23	2.64	2.12	1.32	99.89
			50	156.44	3.12	1.99	1.56	1.00	97.60
			60	155.08	1.15	0.74	0.58	0.37	96.75
	34.9	184.34	25	182.14	2.67	1.47	1.34	0.73	98.81
			50	179.99	2.43	1.35	1.22	0.68	97.64
			60	178.12	3.65	2.05	1.83	1.02	96.63
	38.1	173.43	25	177.70	1.24	0.70	0.62	0.35	102.46
			50	175.67	2.54	1.45	1.27	0.72	101.29
			60	171.01	1.87	1.09	0.94	0.55	98.61
	41.3	196.91	25	198.71	2.12	1.07	1.06	0.53	100.91
			50	197.52	2.56	1.30	1.28	0.65	100.31
			60	195.21	4.32	2.21	2.16	1.11	99.13
44.5	181.87	25	185.03	3.12	1.69	1.56	0.84	101.74	
		50	182.10	3.24	1.78	1.62	0.89	100.13	
		60	179.67	4.01	2.23	2.01	1.12	98.79	
polyester	25.4	153.58	25	141.31	3.54	2.51	1.77	1.25	92.01
			50	136.71	2.67	1.95	1.34	0.98	89.01
			60	129.79	3.05	2.35	1.53	1.17	84.51
	28.6	165.49	25	155.89	2.65	1.70	1.33	0.85	94.20
			50	154.21	1.65	1.07	0.83	0.53	93.18
			60	151.78	3.63	2.39	1.82	1.20	91.72
	31.8	150.82	25	142.44	0.99	0.70	0.50	0.35	94.44
			50	140.07	1.02	0.73	0.51	0.36	92.87
			60	138.56	1.45	1.05	0.73	0.52	91.87
	34.9	163.68	25	152.54	1.87	1.23	0.94	0.61	93.19
			50	149.87	2.65	1.77	1.33	0.88	91.56
			60	148.41	3.67	2.47	1.84	1.24	90.67

Essai de Vieillissement Accéléré - Cisaillement Direct									
résine	d (mm)	Tu ini (MPa)	T°C	Tu 60j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%Tu à 60j
vinylester	25.4	167.49	25	166.79	5.03	3.02	2.52	1.51	99.59
			50	161.08	3.01	1.87	1.50	0.93	96.17
			60	158.36	3.13	1.98	1.56	0.99	94.55
	28.6	193.98	25	196.19	2.65	1.35	1.32	0.68	101.14
			50	188.05	2.18	1.16	1.09	0.58	96.94
			60	183.16	4.76	2.60	2.38	1.30	94.42
	31.8	160.29	25	160.14	2.96	1.85	1.48	0.93	99.91
			50	152.75	4.07	2.66	2.04	1.33	95.30
			60	150.03	4.76	3.17	2.38	1.59	93.60
	34.9	184.34	25	180.34	1.97	1.09	0.98	0.55	97.83
			50	175.67	4.17	2.38	2.09	1.19	95.30
			60	172.35	1.85	1.07	0.92	0.54	93.50
	38.1	173.43	25	181.85	1.93	1.06	0.97	0.53	104.86
			50	177.62	1.84	1.04	0.92	0.52	102.41
			60	168.61	0.86	0.51	0.43	0.25	97.22
	41.3	196.91	25	200.49	2.97	1.48	1.49	0.74	101.82
			50	198.18	1.63	0.82	0.81	0.41	100.64
			60	193.59	2.63	1.36	1.32	0.68	98.31
	44.5	181.87	25	188.21	1.35	0.72	0.68	0.36	103.48
			50	182.87	2.10	1.15	1.05	0.57	100.55
			60	177.61	2.12	1.19	1.06	0.60	97.66
polyester	25.4	153.58	25	135.57	4.03	2.97	2.01	1.49	88.27
			50	129.46	3.91	3.02	1.95	1.51	84.30
			60	125.47	2.12	1.69	1.06	0.84	81.69
	28.6	165.49	25	148.26	2.00	1.35	1.00	0.68	89.59
			50	143.50	3.84	2.68	1.92	1.34	86.71
			60	138.33	2.18	1.57	1.09	0.79	83.59
	31.8	150.82	25	133.96	1.27	0.95	0.63	0.47	88.82
			50	129.38	1.05	0.81	0.53	0.41	85.78
			60	126.45	2.30	1.82	1.15	0.91	83.84
	34.9	163.68	25	142.18	3.62	2.55	1.81	1.27	86.87
			50	136.18	3.97	2.92	1.99	1.46	83.20
			60	133.09	4.16	3.13	2.08	1.56	81.31

Essai de Vieillessement Accéléré - Cisaillement Direct									
résine	d (mm)	Tu ini (MPa)	T°C	Tu 180j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%Tu à 180j
vinylester	25.4	167.49	25	163.23	4.49	2.75	2.24	1.37	97.46
			50	159.69	4.85	3.04	2.42	1.52	95.34
			60	151.26	2.52	1.67	1.26	0.83	90.31
	28.6	193.98	25	191.03	2.24	1.17	1.12	0.59	98.48
			50	185.78	3.30	1.78	1.65	0.89	95.77
			60	174.67	1.55	0.89	0.77	0.44	90.04
	31.8	160.29	25	156.50	4.99	3.19	2.49	1.59	97.63
			50	150.94	1.66	1.10	0.83	0.55	94.16
			60	145.78	2.47	1.70	1.24	0.85	90.94
	34.9	184.34	25	178.92	1.87	1.05	0.94	0.52	97.06
			50	172.67	3.11	1.80	1.56	0.90	93.67
			60	167.49	3.65	2.18	1.83	1.09	90.86
	38.1	173.43	25	176.48	2.14	1.21	1.07	0.61	101.76
			50	169.83	0.73	0.43	0.36	0.21	97.92
			60	157.66	3.27	2.07	1.63	1.04	90.91
	41.3	196.91	25	197.19	0.86	0.44	0.43	0.22	100.14
			50	190.10	3.17	1.67	1.58	0.83	96.54
			60	178.50	0.60	0.34	0.30	0.17	90.65
	44.5	181.87	25	181.75	1.85	1.02	0.93	0.51	99.94
			50	176.75	1.60	0.90	0.80	0.45	97.19
			60	165.61	1.86	1.12	0.93	0.56	91.06
polyester	25.4	153.58	25	132.68	1.20	0.90	0.60	0.45	86.39
			50	125.37	4.29	3.42	2.14	1.71	81.63
			60	117.32	2.17	1.85	1.09	0.93	76.39
	28.6	165.49	25	143.93	4.10	2.85	2.05	1.43	86.97
			50	137.08	4.52	3.30	2.26	1.65	82.84
			60	127.75	1.15	0.90	0.57	0.45	77.20
	31.8	150.82	25	128.99	1.37	1.06	0.69	0.53	85.52
			50	124.82	2.00	1.60	1.00	0.80	82.76
			60	116.87	2.12	1.81	1.06	0.91	77.49
	34.9	163.68	25	138.41	2.79	2.02	1.40	1.01	84.56
			50	131.42	1.47	1.12	0.73	0.56	80.29
			60	125.40	1.55	1.23	0.77	0.62	76.61

Essai de Vieillessement Accéléré - Flexion par 4 points										
résine	d (mm)	Tu ini (MPa)	T°C	Tu 30j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%Tu à 30j	
vinylester	25.4	1 324.31	25	1 340.89	60.34	4.50	30.17	2.25	101.25	
			50	1 311.11	42.98	3.28	21.49	1.64	99.00	
			60	1 294.51	75.45	5.83	37.73	2.91	97.75	
	28.6	1 213.24	25	1 222.92	60.45	4.94	30.23	2.47	100.80	
			50	1 202.12	45.98	3.82	22.99	1.91	99.08	
			60	1 193.12	69.12	5.79	34.56	2.90	98.34	
	31.8	1 165.20	25	1 172.10	55.74	4.76	27.87	2.38	100.59	
			50	1 160.43	59.54	5.13	29.77	2.57	99.59	
			60	1 150.43	40.87	3.55	20.44	1.78	98.73	
	34.9	1 210.19	25	1 202.43	30.64	2.55	15.32	1.27	99.36	
			50	1 200.04	38.14	3.18	19.07	1.59	99.16	
			60	1 190.54	75.96	6.38	37.98	3.19	98.38	
	38.1	1 077.01	25	1 080.12	25.68	2.38	12.84	1.19	100.29	
			50	1 075.43	36.24	3.37	18.12	1.68	99.85	
			60	1 065.43	55.98	5.25	27.99	2.63	98.93	
	41.3	1 015.31	25	1 020.90	39.43	3.86	19.72	1.93	100.55	
			50	1 012.12	55.00	5.43	27.50	2.72	99.69	
			60	999.43	62.00	6.20	31.00	3.10	98.44	
	44.5	1 040.29	25	1 044.54	23.65	2.26	11.83	1.13	100.41	
			50	1 035.01	22.76	2.20	11.38	1.10	99.49	
			60	1 025.67	18.64	1.82	9.32	0.91	98.59	
	polyester	25.4	1 080.91	25	1 016.07	25.82	2.54	12.91	1.27	94.00
				50	962.00	55.61	5.78	27.81	2.89	89.00
				60	897.19	21.76	2.43	10.88	1.21	83.00
28.6		787.68	25	735.12	22.54	3.07	11.27	1.53	93.33	
			50	715.12	32.98	4.61	16.49	2.31	90.79	
			60	668.34	30.24	4.52	15.12	2.26	84.85	
31.8		839.31	25	796.12	39.45	4.96	19.73	2.48	94.85	
			50	760.13	45.21	5.95	22.61	2.97	90.57	
			60	715.34	25.47	3.56	12.74	1.78	85.23	
34.9		758.67	25	713.67	25.96	3.64	12.98	1.82	94.07	
			50	690.43	16.47	2.39	8.24	1.19	91.01	
			60	647.87	12.87	1.99	6.44	0.99	85.40	

Essai de Vieillessement Accéléré - Flexion par 4 points									
résine	d (mm)	Tu ini (MPa)	T°C	Tu 60j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%Tu à 60j
vinylester	25.4	1 324.31	25	1 333.02	59.20	4.44	29.60	2.22	100.66
			50	1 301.51	42.67	3.28	21.33	1.64	98.28
			60	1 285.96	74.69	5.81	37.34	2.90	97.10
	28.6	1 213.24	25	1 232.61	64.17	5.21	32.09	2.60	101.60
			50	1 192.19	40.92	3.43	20.46	1.72	98.27
			60	1 178.63	66.13	5.61	33.07	2.81	97.15
	31.8	1 165.20	25	1 180.25	63.08	5.34	31.54	2.67	101.29
			50	1 156.76	50.29	4.35	25.14	2.17	99.28
			60	1 146.71	42.99	3.75	21.50	1.87	98.41
	34.9	1 210.19	25	1 195.17	26.57	2.22	13.28	1.11	98.76
			50	1 190.14	37.18	3.12	18.59	1.56	98.34
			60	1 183.01	73.62	6.22	36.81	3.11	97.75
	38.1	1 077.01	25	1 084.55	20.15	1.86	10.07	0.93	100.70
			50	1 076.46	35.86	3.33	17.93	1.67	99.95
			60	1 058.33	53.88	5.09	26.94	2.55	98.27
	41.3	1 015.31	25	1 026.40	38.11	3.71	19.06	1.86	101.09
			50	1 010.50	52.22	5.17	26.11	2.58	99.53
			60	986.23	26.75	2.71	13.37	1.36	97.14
	44.5	1 040.29	25	1 049.09	22.60	2.15	11.30	1.08	100.85
			50	1 031.04	22.55	2.19	11.28	1.09	99.11
			60	1 022.22	12.54	1.23	6.27	0.61	98.26
polyester	25.4	1 080.91	25	934.10	25.75	2.76	12.88	1.38	86.42
			50	888.69	54.04	6.08	27.02	3.04	82.22
			60	844.35	20.95	2.48	10.47	1.24	78.11
	28.6	787.68	25	679.40	22.54	3.32	11.27	1.66	86.25
			50	653.21	29.94	4.58	14.97	2.29	82.93
			60	630.93	30.24	4.79	15.12	2.40	80.10
	31.8	839.31	25	757.39	36.29	4.79	18.14	2.40	90.24
			50	699.12	40.38	5.78	20.19	2.89	83.30
			60	682.63	17.12	2.51	8.56	1.25	81.33
	34.9	758.67	25	668.66	20.88	3.12	10.44	1.56	88.14
			50	621.54	17.55	2.82	8.77	1.41	81.93
			60	605.53	6.81	1.12	3.40	0.56	79.81

Essai de Vieillesse Accéléré - Flexion par 4 points										
résine	d (mm)	Tu ini (MPa)	T°C	Tu 180j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%Tu à 180j	
vinylester	25.4	1 324.31	25	1 321.70	42.96	3.25	21.48	1.63	99.80	
			50	1 290.93	54.28	4.21	27.14	2.10	97.48	
			60	1 261.86	73.64	5.84	36.82	2.92	95.28	
	28.6	1 213.24	25	1 213.84	34.04	2.80	17.02	1.40	100.05	
			50	1 179.32	44.38	3.76	22.19	1.88	97.20	
			60	1 157.41	45.10	3.90	22.55	1.95	95.40	
	31.8	1 165.20	25	1 159.46	20.27	1.75	10.14	0.87	99.51	
			50	1 132.61	8.97	0.79	4.49	0.40	97.20	
			60	1 113.56	19.16	1.72	9.58	0.86	95.57	
	34.9	1 210.19	25	1 189.56	17.52	1.47	8.76	0.74	98.30	
			50	1 179.31	19.45	1.65	9.72	0.82	97.45	
			60	1 154.29	54.37	4.71	27.18	2.35	95.38	
	38.1	1 077.01	25	1 087.40	70.25	6.46	35.13	3.23	100.97	
			50	1 058.44	36.91	3.49	18.46	1.74	98.28	
			60	1 048.50	12.47	1.19	6.24	0.59	97.35	
	41.3	1 015.31	25	1 018.21	37.59	3.69	18.79	1.85	100.29	
			50	1 000.78	46.14	4.61	23.07	2.31	98.57	
			60	990.76	19.63	1.98	9.82	0.99	97.58	
	44.5	1 040.29	25	1 039.71	37.07	3.57	18.53	1.78	99.94	
			50	1 020.48	32.02	3.14	16.01	1.57	98.10	
			60	1 020.98	13.55	1.33	6.77	0.66	98.14	
	polyester	25.4	1 080.91	25	869.78	25.27	2.91	12.63	1.45	80.47
				50	807.96	30.40	3.76	15.20	1.88	74.75
				60	710.89	20.39	2.87	10.19	1.43	65.77
28.6		787.68	25	640.64	9.84	1.54	4.92	0.77	81.33	
			50	587.52	38.29	6.52	19.15	3.26	74.59	
			60	526.62	40.40	7.67	20.20	3.84	66.86	
31.8		839.31	25	674.32	19.08	2.83	9.54	1.41	80.34	
			50	625.31	30.58	4.89	15.29	2.45	74.50	
			60	558.46	22.10	3.96	11.05	1.98	66.54	
34.9		758.67	25	611.77	22.80	3.73	11.40	1.86	80.64	
			50	555.10	24.71	4.45	12.36	2.23	73.17	
			60	497.52	13.12	2.64	6.56	1.32	65.58	

Essai de Vieillissement Accéléré - Module en Flexion										
résine	d (mm)	E ini (MPa)	T°C	E 60j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%E à 60j	
vinylester	25.4	54 078.64	25	53 701.63	906.99	1.69	453.50	0.84	99.30	
			50	52 834.72	1 613.45	3.05	806.73	1.53	97.70	
			60	52 671.56	1 732.29	3.29	866.15	1.64	97.40	
	28.6	53 386.62	25	52 973.44	1 703.87	3.22	851.94	1.61	99.23	
			50	52 234.51	1 071.69	2.05	535.84	1.03	97.84	
			60	52 038.53	568.06	1.09	284.03	0.55	97.47	
	31.8	52 600.45	25	52 154.28	2 057.71	3.95	1 028.86	1.97	99.15	
			50	51 421.67	5 347.14	10.40	2 673.57	5.20	97.76	
			60	51 254.68	1 346.21	2.63	673.11	1.31	97.44	
	34.9	50 310.13	25	49 950.00	268.46	0.54	134.23	0.27	99.28	
			50	50 129.80	449.89	0.90	224.94	0.45	99.64	
			60	50 126.28	706.68	1.41	353.34	0.70	99.63	
	38.1	51 628.04	25	51 228.14	1 691.17	3.30	845.59	1.65	99.23	
			50	51 002.82	520.36	1.02	260.18	0.51	98.79	
			60	50 936.25	1 159.78	2.28	579.89	1.14	98.66	
	41.3	50 195.96	25	49 968.07	1 460.30	2.92	730.15	1.46	99.55	
			50	50 165.92	631.11	1.26	315.56	0.63	99.94	
			60	49 867.02	521.64	1.05	260.82	0.52	99.34	
	44.5	49 283.93	25	49 094.76	144.32	0.29	72.16	0.15	99.62	
			50	48 868.09	255.05	0.52	127.53	0.26	99.16	
			60	49 083.87	299.96	0.61	149.98	0.31	99.59	
	polyester	25.4	51 064.48	25	51 213.89	1 714.54	3.35	857.27	1.67	100.29
				50	50 134.62	1 824.36	3.64	912.18	1.82	98.18
				60	50 229.33	3 057.11	6.09	1 528.55	3.04	98.36
28.6		50 208.37	25	50 068.62	2 406.42	4.81	1 203.21	2.40	99.72	
			50	49 693.15	649.62	1.31	324.81	0.65	98.97	
			60	49 396.79	901.44	1.82	450.72	0.91	98.38	
31.8		51 597.44	25	50 715.19	1 491.39	2.94	745.69	1.47	98.29	
			50	51 300.77	2 654.51	5.17	1 327.26	2.59	99.43	
			60	50 629.21	934.90	1.85	467.45	0.92	98.12	
34.9		49 451.38	25	49 200.57	2 076.96	4.22	1 038.48	2.11	99.49	
			50	48 726.00	4 126.03	8.47	2 063.02	4.23	98.53	
			60	48 591.70	4 687.50	9.65	2 343.75	4.82	98.26	

Essai de Vieillesse Accéléré - Module en Flexion										
résine	d (mm)	E ini (MPa)	T°C	E 180j (MPa)	Ecart type (MPa)	Ecart type (%)	Ecart type de la moyenne (MPa)	Ecart type de la moyenne (%)	%E à 180j	
vinylester	25.4	54 078.64	25	53 268.68	532.44	1.00	266.22	0.50	98.50	
			50	53 061.03	135.31	0.26	67.65	0.13	98.12	
			60	52 946.10	1 264.01	2.39	632.00	1.19	97.91	
	28.6	53 386.62	25	52 190.02	182.79	0.35	91.39	0.18	97.76	
			50	51 894.77	1 217.12	2.35	608.56	1.17	97.21	
			60	51 678.11	1 201.41	2.32	600.71	1.16	96.80	
	31.8	52 600.45	25	51 586.79	208.57	0.40	104.29	0.20	98.07	
			50	51 435.29	244.02	0.47	122.01	0.24	97.78	
			60	51 341.64	462.83	0.90	231.41	0.45	97.61	
	34.9	50 310.13	25	49 836.47	1 462.01	2.93	731.00	1.47	99.06	
			50	49 821.05	1 578.17	3.17	789.09	1.58	99.03	
			60	49 788.87	1 444.33	2.90	722.17	1.45	98.96	
	38.1	51 628.04	25	51 061.73	1 132.73	2.22	566.37	1.11	98.90	
			50	50 784.55	1 037.21	2.04	518.61	1.02	98.37	
			60	50 943.49	757.95	1.49	378.97	0.74	98.67	
	41.3	50 195.96	25	49 315.60	1 708.11	3.46	854.06	1.73	98.25	
			50	49 850.18	315.61	0.63	157.81	0.32	99.31	
			60	49 985.57	355.70	0.71	177.85	0.36	99.58	
	44.5	49 283.93	25	48 720.42	1 130.10	2.32	565.05	1.16	98.86	
			50	48 977.21	314.57	0.64	157.29	0.32	99.38	
			60	48 921.92	374.33	0.77	187.16	0.38	99.27	
	polyester	25.4	51 064.48	25	50 416.01	1 634.72	3.24	817.36	1.62	98.73
				50	49 682.78	1 162.46	2.34	581.23	1.17	97.29
				60	48 362.49	1 322.11	2.73	661.06	1.37	94.71
28.6		50 208.37	25	49 303.40	151.36	0.31	75.68	0.15	98.20	
			50	48 827.05	778.70	1.59	389.35	0.80	97.25	
			60	47 762.49	645.01	1.35	322.50	0.68	95.13	
31.8		51 597.44	25	50 642.90	1 287.05	2.54	643.53	1.27	98.15	
			50	50 028.52	1 679.33	3.36	839.67	1.68	96.96	
			60	49 189.43	375.30	0.76	187.65	0.38	95.33	
34.9		49 451.38	25	48 317.51	1 681.72	3.48	840.86	1.74	97.71	
			50	47 999.33	1 405.32	2.93	702.66	1.46	97.06	
			60	47 196.47	261.99	0.56	130.99	0.28	95.44	

Liste des références

ACI 440.3R-04. (2004) *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Etats-Unis, 40 p.

ASTM C 581-03. (2003) *Standard Practice for Determining Chemical Resistance of Thermosetting Resins Used in Glass-Fiber-Reinforced Structures Intended for Liquid Service*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 5 p.

ASTM C 666/C 666M-03 (2003) *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 6 p.

ASTM D 570-98 (2010) *Water Absorption of Plastics*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 4 p.

ASTM D 790-03. (2003) *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 11 p.

ASTM D 792-08 (2008) *Density and Specific Gravity of Plastics by Displacement*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 8 p.

ASTM D 2344/2344M-00. (2000) *Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 8 p.

ASTM D 3171-09 (2009) *Constituent content of composite*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 10 p.

ASTM D 3418-08 (2008) *Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 7 p.

ASTM D 4475-02. (2008) *Standart test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short beam method*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 4 p.

ASTM D 4476-03. (2003) *Standard Test Method for Flexural Properties of Fiber Reinforced Pultruded Plastic Rods*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 4 p.

ASTM D 5028 (1990) *Curing Properties of Pultrusion Resin by Thermal Analysis*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 4 p.

ASTM D 5117-09 (2009) *Standard Test Method for Dye Penetration of Solid Fiberglass Reinforced Pultruded Stock*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 3 p.

ASTM E 831-06 (2006) *Linear Thermal Expansion of Solids Materials by Thermo-mechanical Analysis (TMA)*. American Society for Testing and Material, Conshohocken, Etats-Unis, 5 p.

Briaud, J-L., Li, Y., Rhee, K. (2006) A Soil Modulus Device for Compaction Control. *Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*, Volume 132, n°1, 23 p.

CAN/CSA-S806-02. (2004) *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers annexe N*. CSA-S806-02, Canadian Standards Association, Toronto, Canada, 177 p.

CAN/CSA-S807. (2010) *FRP Product Specification*. CSA-S807, Canadian Standards Association, Toronto, Canada, 44 p.

Chen, Y., Davalos, J. et Ray, I. (août 2006) Durability Prediction for GFRP Reinforcing Bars Using Short-Term Data of Accelerated Aging Tests. *Journal of Composites for Construction*, Volume 10, n° 4, p 279-286.

Ciment Québec. (juin 2002) *Les routes en béton*. Synergie Numéro 1, Ciment Québec, Saint-Basile-Comté-de-Portneuf, Canada, 8 p.

Davis, D. et Porter, M. (1998) Evaluation of Glass Fiber Reinforced Plastic Dowels as Load Transfer Devices in Highway Pavement Slabs. 1998 Transportation Conference Proceedings, Ames, Etast-Unis, 4 p.

Dejke, V. (1999) *Durability and Service Life Prediction of GRFP for Concrete Reinforcement*, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, 10 p.

Dowel Bar Team 2. (1998) *Recommended FRP Dowel Bar Durability Test Protocol*, Market Development Alliance of the SPI Composites Institute, Harrison, Etats Unis, 26 p.

Eddie, D. (mars 1999) Glass Fiber-Reinforced Polymer Dowels for Concrete Pavements. Master of Science Thesis, University of Manitoba, Department of Civil Engineering, Winnipeg, Canada, 113 p.

Eddie, D., Shalaby, A. et Rizkalla, S. (1999) Glass Fiber-Reinforced Polymer Dowels for Concrete Pavements. World Wise Conference, University of Manitoba, Winnipeg, Canada, 10 p.

Eddie, D., Shalaby, A. et Rizkalla, S. (mars 2001) Glass Fiber-Reinforced Polymer Dowels for Concrete Pavements. *ACI Structure Journal*, Volume 98, n° 2, p. 201-206.

Federal Highway Administration. (2009) *Design and Evaluation of Jointed Plain Concrete Pavement with Fiber Reinforced Polymer Dowels*. Rapport final FHWA HRT-06-106, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington DC, Etats-Unis, 30 p.

Friberg, B. (1940) Design of Dowels in Transverse Joints of Concrete Pavements. *American Society of Civil Engineers*, Volume 105, n° 2081, p. 1809-1828.

Illinois Department of Transportation. (2005) *Concrete Pavement Joints*. Rapport technique PTA-D3, Bureau of Materials and Physical Research, Illinois Department of Transportation, Springfield, Etats-Unis, 3 p.

Ioannides, A. et Korovesis, G. (1992) Analysis and Design of Doweled Slab-on-Grade Pavement Systems. *Journal of Transportation Engineering*, Volume 118, n° 6, p 745-768.

ISIS Canada. (2007) *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*, Design Manual n° 3. The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada Corp., Winnipeg, Canada, 151 p.

Maitra, S., Reddy, K. et Ramachandra, L. (novembre 2009) Load transfer characteristics of dowel bar system in jointed concrete pavement. *Journal of Transportation Engineering*, Volume 135, n° 11, p 813-821.

Mannava, S., Buch, D., Kukreti, A. (décembre 1999) Load-Deflection Behavior of Smooth Dowels. *ACI Structure Journal*, Volume 96, n° 6, p. 891-898.

Milind, P., Amit, V. et Neeraj, B. (août 2006) Experimental investigation of effects of dowel misalignment on joint opening behavior in rigid pavements. *Transportation Research Record*, n° 1947, p 15-27.

Milind, P., Amit, V. et Neeraj, B. (février 2009) Analytical investigation of the effects of dowel misalignment on concrete pavement joint opening behaviour. *International Journal of Pavement Engineering*, Volume 10, n° 1, p 49-62.

Murison, S., Shalaby, A. et Mufti, A. (juin 2002) Modelling of Concrete dowel-slab Interaction. 4e Conférence spécialisée en génie des transports de la Société canadienne de génie civil, Montréal, Canada, 10 p.

Murison, S., Shalaby, A. et Mufti, A. (2004) *Laboratory Evaluation of Concrete-Filled GFRP Dowels in Jointed Concrete Pavements*. Accelerated Field and Laboratory Pavement Testing Session of the 2004 Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Québec, Canada, 14 p.

Nishizaki, I. et Meiarashi, S. (février 2001) Long-Term Deterioration of GFRP in Water and Moist Environment. *Journal of Composites for Construction*, Volume 6, n° 1, p 21-27.

Park, C. Jang, C. Lee, S. et Won, J. (2008) Bond Properties of Glass Fibre-Reinforced Polymer Dowel Bars in Jointed Concrete. *Polymers and Polymer Composites*, Volume 16, n° 3, p 187-192.

Park, C. Jang, C. Lee, S. et Won, J. (février 2008) Microstructural investigation of long-term degradation mechanisms in GFRP dowel bars for jointed concrete pavement. *Journal of Applied Polymer Science*, Volume 108, n° 5, p 3128-3137.

Porter, M. (2002) *Assessment of dowel bar research*. Final Report, CTRE, Department of civil and construction engineering, Iowa State University, Ames, Etats-Unis, 81 p.

Porter, M. (2003) Alternative Dowel Bars. Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Etats-Unis, 10 p.

Porter, M., Cable, J., Fanous, F., Harrington, J. et Pierson, N. (avril 2006) *Laboratory Study of Structural Behavior of Alternative Dowel Bars*. Rapport final FHWA DTFH61-01-X-00042, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington DC, Etats-Unis, 99 p.

Prabhu, M., Varma, A. et Buch, N. (février 2009) Analytical investigation of the effects of dowel misalignment on concrete pavement joint opening behaviour. *International Journal of Pavement Engineering*, Volume 10, n°1, p 49-62.

Robert, M., Cousin, P. et Benmokrane, B. (décembre 2008) Influence de la température sur le comportement des composites de PRF pour le génie civil. *Annales du BTP*, n° 6, p 21-27.

Robert, M., Cousin, P. et Benmokrane, B. (avril 2009) Durability of GFRP Reinforcing Bars Embedded in Moist Concrete. *Journal of Composites for Construction*, Volume 13, n° 2, p 66-73.

Smith, K. (2001) *Alternative dowel bar for load transfer in jointed concrete pavement*. Essai FHWA052, Federal Highway Administration, Office of Acquisition Management, Washington DC, Etats Unis, 20 p.

Timoshenko, S. et Lessels, J. (1925) *Applied Elasticity*, Pennsylvania Westinghouse Technical Night School Press, USA.

Transports Québec. (2000) *Guide des normes de charges et dimensions des véhicules*, Ministère des Transports du Québec, Québec, Canada, 26 p.

Transports Québec. (2008) *Défectomètre à masse tombante (FWD)*, Ministère des Transports du Québec, Québec, Canada, 2 p.

Transports Québec. (janvier 2009) *Bulletin Innovation Transport*. Numéro 34, Ministère des Transports du Québec, Québec, Canada, 42 p.

Trejo, D., Gardoni, P., Kim, J. et Zidek, J. (décembre 2009) *Long Term Performance of GFRP Reinforcement*. Rapport Technique FHWA/TX-09/0-6069-1, Texas Department of Transportation, Research and Technology Implementation Office, Austin, Etats-Unis, 140 p.

Turgeon, J-P. et Maillard, P-L. (avril 2009) Les chaussées municipales en béton. AQTR 44^{ème} congrès de Montréal, Association Canadienne du Ciment, Montréal, Canada, 12 p.

Vijay, P-V. (1999) Aging and Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars. Essai, West Virginia University, Department of Civil Engineering, Morgantown, Etats-Unis, 232 p.

Wang, W., Basheer, I. et Petros, K. (août 2006) Jointed Plain Concrete Pavement Model Evaluation. *Transportation Research Record*, n° 1947, p 49-58.

Won, J., Cho, Y. et Jang, C. (février 2006) The Durability of Glass Fibre-Reinforced Polymer Dowel after Accelerated Environmental Exposure. *Polymers & Polymer Composites*, Volume 14, n° 7, p 719-730.

Zhang, B., Masmoudi, R. et Benmokrane, B. (juillet 2006) New Method for Testing Fiber-reinforced Polymer Rods Under Flexure. *Journal of Testing and Evaluation*, Volume 35, n° 2, 6 p.