



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Ministère des Transports du Québec
Direction des structures

**CHAIRE DE RECHERCHE DU CRSNG SUR LE RENFORCEMENT EN MATÉRIAUX
COMPOSITES POUR LES STRUCTURES EN BÉTON**

Contrat : 1220-99-BD02

**RENFORCEMENT DE LA DALLE DU TABLIER À L'AIDE DE
L'ARMATURE EN MATÉRIAUX COMPOSITES À BASE DE
FIBRES DE CARBONE ISOROD**

Rapport Final



Préparé par

C. Kassem , K. Laoubi, B. Tighiouart, R. Masmoudi et B. Benmokrane

ISIS-Sherbrooke, Département de Génie Civil , Faculté de Génie
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1

Tél. : (819) 821-7758

Fax. : (819) 821-7974

E-mail: bbenmokrane@andrew.sca.usherb.ca



ISIS CANADA

The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures

Le réseau canadien de Centres d'excellence sur les innovations en structures avec systèmes de détection intégrés

Juillet-2001

© Benmokrane and al.

CANQ
US
217
V.1



Préambule

Dans le cadre du contrat de recherche 1220-99-BD02 entre le ministère des transports du Québec et l'Université de Sherbrooke, une nouvelle armature à béton en matériaux composites constitués de Polymères Renforcés de Fibres de Carbone (PRFC) est évaluée pour son utilisation dans les dalles en béton des tabliers de ponts. Cette nouvelle armature porte le nom commercial ISOROD et est produite par la compagnie Pultrall Inc./ADS Le Groupe Composites Inc. (Thetford Mines, Québec).

Ce rapport final fait suite au rapport d'étape, remis au ministère des Transports du Québec (Direction des Structures) en mars 2000.

Le rapport d'étape a traité des essais préliminaires effectués sur le produit (armature en fibre de carbone ISOROD) durant sa phase de développement et d'optimisation des propriétés mécaniques et structurales. La phase de développement et d'optimisation portait sur la détermination du taux optimum en fibre de carbone d'une part, et la mise au point d'un nouveau procédé pour le revêtement extérieur de l'armature afin d'assurer une bonne adhérence au béton structural, d'autre part. Les essais préliminaires effectués comprenaient des essais de traction uniaxiale, des essais de durabilité (armature sous tension en milieu alcalin), des essais d'adhérence armature/béton et des essais de flexion sur des poutres en béton armé. Les résultats préliminaires obtenus ont été très satisfaisants, ce qui a permis la poursuite du projet de recherche.

Ce rapport final présente les résultats d'essais effectués sur le l'armature en fibre de carbone ISOROD optimisée. Les résultats d'essais de traction, d'essais d'adhérence d'armature noyée dans

le béton et d'essais de chargements statiques effectués sur des dalles unidirectionnelles en béton armé à l'aide d'armature en matériaux composites et avec de l'armature conventionnelle en acier sont décrits.

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION.....	1
2.	OBJECTIFS DU PROJET.....	3
3.	ESSAIS EN LABORATOIRE SUR L'ARMATURE EN FIBRE DE CARBONE ISOROD OPTIMISÉE.....	3
3.1.	PROPRIÉTÉS EN TRACTION	3
3.1.1	Échantillons et procédure d'essai.....	3
3.1.2	Résultats d'essais en traction.....	4
3.2	PROPRIÉTÉS D'ADHÉRENCE.....	5
3.2.1	Échantillons pour les essais d'arrachement.....	5
3.2.2	Résultats des essais d'arrachement.....	6
3.2.3	Longueur d'ancrage optimale.....	7
3.3	PROPRIÉTÉS STRUCTURALES: ESSAIS DE FLEXION SUR DES DALLES EN BÉTON UNIDIRECTIONNELLES.....	8
3.3.1	Matériaux.....	8
3.3.2	Caractéristiques des dalles unidirectionnelles en béton armé.....	8
3.3.3	Instrumentation.....	9
3.3.4	Montage expérimental et procédure d'essai.....	10
3.3.5	Résultats et discussion.....	10
4.	CONCLUSION.....	12
	REMERCIEMENTS.....	13
	RÉFÉRENCES.....	14

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Propriétés en traction de l'armature en fibre de carbone optimisée....	16
Tableau 2	Caractéristiques des essais d'arrachement.....	16
Tableau 3	Résultats des essais d'arrachement de barres d'armature Isorod à base de fibres de carbone noyées dans le béton	17
Tableau 4	Armatures de renforcement pour la dalle D-RF.....	18
Tableau 5	Armatures de renforcement pour la dalle D-AC.....	18
Tableau 6	Résultats des essais de flexion des dalles testées.....	19

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Vue de la barre d'armature ISOROD en fibre de carbone optimisé...	20
Figure 2	Détails géométriques d'un échantillon pour l'essai de traction.....	20
Figure 3.	Vue du montage de l'essai de traction.....	21
Figure 4	Courbe contrainte-déformation de la barre d'armature	21
Figure 5.	Modes de rupture en traction de la barre d'armature	22
Figure 6	Détails géométriques des échantillons pour les essais d'arrachement.....	22
Figure 7	Échantillon utilisé pour les essais d'arrachement.....	23
Figure 8	Vue du montage utilisé pour les essais d'arrachement.....	24
Figure 9	Longueur optimale d'ancrage.....	24
Figure 10.	Vue de l'armature conventionnelle utilisées dans les dalles.....	27
Figure 11.	Vue rapprochée des 2 nappes d'armature en acier utilisés dans les dalles	27
Figure 12.	Vue d'un lit d'armature en matériaux composites utilisé dans les dalles..	28
Figure 13.	Vue rapprochée d'un lit d'armature en matériaux composites utilisée dans les dalles (ISOROD).....	28
Figure 14.	Vue rapprochée de l'armature en matériaux composites (ISOROD).....	29
Figure 15.	Vue rapprochée des 2 nappes (supérieure et inférieure) d'armature en matériaux composites utilisé dans les dalles.....	29
Figure 16.	Vue du coffrage d'une dalle avec les 2 nappes d'armature (supérieure et inférieure).....	30
Figure 17	Vue rapprochée montrant 3 barres d'armature longitudinales assemblées.....	30
Figure 18	Essai de flexion 4 points.....	31
Figure 19.	Vue du montage expérimental utilisé lors des essais de flexion des dalles.	31
Figure 20.	Vue de l'instrumentation de la face comprimée du béton des dalles.....	32
Figure 21.	Vue montrant les LVDTs pour la mesure de la largeur des fissures et de la déflexion au centre de la portée	32
Figure 22	LVDTs positionnés aux bout des barres d'armature ISOROD pour mesurer le glissement s'il y a lieu.....	33

Figure 23	Vue rapprochée du LVDT de haute résolution pour la mesure de la largeur des fissures.....	33
Figure 24.	Vue de la dalle armée de barres en acier en cours d'essai.....	34
Figure 25	Largeur des fissures en fonction de la charge appliquée.....	34
Figure 26	Courbes de la déflexion en fonction de la charge appliquée.....	35
Figure 27	Déformations types de l'armature et du béton.....	35
Figure 28.	Mode de rupture de la dalle armée de barres ISOROD.....	36

1. INTRODUCTION

Les tabliers de ponts en béton armé sont parmi les structures les plus exposées aux conditions favorisant la corrosion de l'armature d'acier et l'éclatement du béton (gel/dégel, séchage/mouillage, humidité, sels de déverglaçage, surcharges mécaniques dues à un flux de circulation de plus en plus dense et à des moyens de transports de plus en plus lourds). Par conséquent, la durée de vie des tabliers de ponts se trouve considérablement réduite engendrant ainsi des coûts de réparation très élevés. L'utilisation de béton à faible perméabilité, l'augmentation de l'épaisseur de recouvrement, le traitement des surfaces extérieures du béton à l'aide de silanes, la protection cathodique des renforcements, le revêtement de l'acier à l'aide d'une couche de résine d'époxyde, la galvanisation et l'utilisation de l'acier inoxydable sont les principales techniques qui ont été considérées en pratique pour retarder la corrosion de l'acier et l'éclatement du béton. Cependant, ces matériaux et techniques se sont avérés inefficaces, surtout dans le cas de structures exposées à des environnements particulièrement agressifs, tels que les tabliers de ponts, les constructions côtières et les stationnements multi-étagés dans les régions nordiques où l'on a souvent recours à l'utilisation de sel et de produits pour le déverglaçage. Pour augmenter la durée de vie des structures en béton armé, on fait maintenant de plus en plus appel à la nouvelle technologie des armatures en matériaux composites constitués de polymères renforcés de fibres [1-4]. En plus d'être très résistantes à la corrosion, les armatures en matériaux composites présentent d'autres avantages par rapport à l'armature conventionnelle en acier en termes de légèreté, de résistance mécanique et de neutralité électromagnétique. L'armature à béton en matériaux composites peut donc constituer une solution très avantageuse pour les tabliers de ponts (dalles et poutres) [5-7]. Ces nouvelles armatures à béton font maintenant l'objet

d'une nouvelle Section (Section 16) dans le nouveau Code canadien pour le calcul de ponts routiers qui vient d'être publié en décembre 2000 (CHBDC, 2000)

Ce projet de recherche entre le ministère des Transports du Québec (Direction des Structures) et l'Université de Sherbrooke porte sur le développement, l'optimisation et la caractérisation d'une nouvelle armature à béton en matériaux composites à base de fibres de carbone pour son utilisation dans le renforcement de dalles en béton des tabliers de ponts.. Cette armature porte le nom commercial ISOROD et est produite par la compagnie Pultrall Inc./ADS Le Groupe Composites Inc. (Thetford Mines, Québec).

Le rapport d'étape, réalisé dans le cadre de ce projet de recherche, a traité des essais préliminaires effectués sur le produit (armature en fibre de carbone ISOROD) durant sa phase de développement et d'optimisation des propriétés mécaniques et structurales. La phase de développement et d'optimisation portait sur la détermination du taux optimum en fibre de carbone d'une part, et la mise au point d'un nouveau procédé pour le revêtement extérieur de l'armature afin d'assurer une bonne adhérence au béton structural, d'autre part. Les essais préliminaires effectués comprenaient des essais de traction uniaxiale, des essais de durabilité (armature sous tension en milieu alcalin), des essais d'adhérence armature/béton et des essais de flexion sur des poutres en béton armé. Les résultats préliminaires obtenus ont été très satisfaisants, ce qui a permis la poursuite du projet de recherche.

Ce rapport final présente les résultats d'essais effectués sur le l'armature en fibre de carbone ISOROD optimisée. Les résultats d'essais de traction, d'essais d'adhérence d'armature noyée dans le béton et d'essais de chargements statiques effectués sur des dalles unidirectionnelles en béton

armé à l'aide d'armature en matériaux composites et avec de l'armature conventionnelle en acier sont décrits.

2. OBJECTIFS DU PROJET

Les objectifs de ce projet de recherche sont :

- 1) Développement et optimisation des propriétés d'une nouvelle armature à béton en matériaux composites à base de fibres de carbone en vue de son utilisation dans les dalles en béton de tabliers de ponts;
- 2) Caractérisation des propriétés mécaniques et structurales de l'armature optimisée à l'aide d'essais en laboratoire. Les propriétés déterminées en laboratoire constituent des paramètres essentiels pour le désign de dalles de ponts routiers en béton armé à l'aide d'armature en matériaux composites.

3. ESSAIS DE CARACTÉRISATION EN LABORATOIRE SUR L'ARMATURE OPTIMISÉE

Les essais de caractérisation en laboratoire sur l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone ISOROD optimisée ont porté sur l'évaluation des propriétés en traction et en adhérence ainsi que l'évaluation de son comportement structural à l'aide de flexion sur de dalles unidirectionnelles en béton armé. La figure 1 montre une vue de l'armature optimisée.

3.1. PROPRIÉTÉS EN TRACTION

3.1.1 Échantillons et procédure d'essai

Les échantillons utilisés pour la détermination des propriétés en traction ont une longueur de 1200 mm. Aux extrémités de la barre, des tubes en acier remplis d'une résine à base d'époxy ont été utilisés pour servir de têtes d'ancrage lors de l'essai de traction. Ces tubes ont une longueur de 400 mm, alors que le rapport de la longueur de la partie centrale sur le diamètre de la barre est égale à 42 (Figure 2).

Les essais de traction ont été réalisés sur une presse d'une capacité de 270 kN. Le taux de chargement est de 250 MPa/min (JSCE 1997). Une vue d'un échantillon lors de l'essai de traction est montrée à la Figure 3. Une cellule de charge a été utilisée pour le contrôle de la force appliquée. Un LVDT (Linear-Variable-Displacement-Transducer) et 2 jauges de déformation de type CEA-13-240UZ-120, sont attachés à l'échantillon pour mesurer les déformations longitudinales et transversales (Figure 4). Un système d'acquisition de données est utilisé pour l'enregistrement des lectures de la cellule de charge, du LVDT et des jauges de déformation. Le LVDT est retiré de l'échantillon lorsque la charge atteint environ 70% de la charge ultime pour éviter des dommages au LVDT. L'essai est poursuivi jusqu'à la rupture totale de l'échantillon. Seuls les résultats des essais avec une rupture au centre des échantillons sont retenus pour l'évaluation de la résistance en traction.

3.1.2 Résultats d'essais en traction

Les résultats d'essai de traction ont montré que la courbe typique contrainte de traction axiale-déformation uniaxiale de barres est pratiquement linéaire et élastique jusqu'à la rupture (Figure 5). Les résistances en traction ont été calculées en utilisant le diamètre nominal de la

barre (9,5 mm). La pente des courbes contraintes-déformations représente le module d'élasticité (E_f) de la barre.

Le Tableau 1 résume les principales propriétés en traction (basées sur une moyenne de dix échantillons) de la barre d'armature ISOROD à base de fibres de carbone optimisée. La résistance moyenne en traction est égale à 1536 ± 61 MPa (109 ± 4 kN), soit 3,0 fois la résistance en traction des barres d'armature en acier. Le module d'élasticité de cette barre est égale à 128 ± 5 GPa, soit environ 65 % celui de l'acier. Comme prévu, la valeur du module élastique obtenue à partir des résultats des jauges électriques est inférieure à celle obtenue à partir des résultats du LVDT. Cela peut être attribué au bas module d'élasticité de la résine sur laquelle les jauges électriques ont été installées.

Ces résultats d'essais de traction montrent que la nouvelle barre d'armature ISOROD en fibres de carbone rencontre les exigences en termes de résistance en traction et de module d'élasticité comme spécifié dans le nouveau manuel de l'American Concrete Institute (ACI) portant sur le design de structures en béton armé à l'aide d'armature en matériaux composites (ACI, 2001)

3.2 PROPRIÉTÉS À L'ADHÉRENCE ARMATURE/BÉTON

Les propriétés à l'adhérence armature/béton ont été déterminées à l'aide d'essais d'arrachement de barres noyées dans le béton.

3.2.1 Échantillons pour les essais d'arrachement

Les essais d'arrachement ont été réalisés sur des barres d'armature ISOROD et des barres d'armature conventionnelle en acier. Cinq longueurs d'ancrage (longueur d'adhérence), soit 5

$d_b, 10 d_b, 15 d_b, 20 d_b$ et $30 d_b$, où d_b est le diamètre nominal de la barre, ont été utilisées dans cette étude. Pour chaque longueur d'ancrage, quatre échantillons de barres en matériaux composites et deux échantillons de barre en acier ont été testés, comme indiqué dans le Tableau 2.

Les échantillons d'essai consistent en des barres de 1100 mm de longueur (composite ou acier) noyées à leurs extrémités dans des blocs de béton de section rectangulaire (150 x 150 mm) et de 500 mm de longueur (Figure 6). Un béton normal, ayant une résistance à la compression de 34 MPa et un module d'élasticité de 29 GPa après 28 jours, a été utilisé.

Les blocs de béton ont été renforcés longitudinalement et transversalement en utilisant des barres en acier lisse de 10 mm de diamètre pour éviter la rupture du béton par éclatement (*splitting failure*) avant l'arrachement de la barre. La partie non adhérente de la barre noyée dans le béton est obtenue en l'enveloppant et en la scellant dans un tube en PVC, pour éviter tout contact avec le béton. La partie centrale de la barre entre les deux blocs de béton a été isolée en insérant du styrofoam entre les 2 blocs. La Figure 6 montre les détails du ferrailage et du coffrage avant le coulage du béton.

Les essais d'arrachement ont été réalisés en utilisant une presse MTS comme le montre la Figure 8. Le taux de chargement varie entre 10 et 15 kN/min (JSCE, 1997). Un système d'acquisition de données automatisé a été utilisé pour enregistrer les valeurs de la charge et du glissement. Plus de détails sur l'installation et la procédure d'essai peuvent être trouvés ailleurs (Adimi et al. 2000).

3.2.2 Résultats des essais d'arrachement

Le Tableau 3 résume les résultats d'essais d'arrachement en terme de charge d'arrachement maximale, correspondant à la contrainte d'adhérence maximum et le mode de rupture observé

durant l'essai. La résistance à l'adhérence (contrainte d'adhérence maximum) est déterminée comme étant la résistance maximale par unité de surface de contact et est obtenue en divisant la charge maximale d'arrachement par la surface de contact entre la barre et le béton en considérant une distribution uniforme des contraintes le long de la longueur d'ancrage (Équation 1):

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{\pi d_b L_a} \quad (1)$$

où τ_{\max} est la résistance d'adhérence maximum (MPa); P_{\max} est la charge d'arrachement maximale appliquée (N); d_b est le diamètre nominal de la barre (mm); et L_a est la longueur d'ancrage (mm).

Comme on peut le voir au Tableau 3, les barres d'armature ISOROD en fibre de carbone de 9,5 mm de diamètre développe une résistance moyenne à l'adhérence de $20,0 \pm 1,2$ MPa, $17,9 \pm 1,2$ MPa et $16,6 \pm 1,1$ MPa pour des longueurs d'ancrage de 50 mm ($5 d_b$), 100 mm ($10 d_b$) et 150 mm ($15 d_b$), respectivement. La rupture par arrachement (*pullout failure*) survient pour une longueur d'ancrage égale ou inférieure à 150 mm ($15 d_b$).

La rupture par traction survient pour une longueur d'ancrage égale ou supérieure à 200 mm ($20 d_b$). Le Tableau 3 montre aussi les résultats des essais d'arrachement des barres d'armature conventionnelles en acier de 11,3 mm de diamètre (10M). Les barres d'armature en acier développent une résistance maximale à l'adhérence de $24,6 \pm 2,1$ MPa pour une longueur d'ancrage de 50 mm ($5 d_b$). La rupture par arrachement de la barre survient pour une longueur d'ancrage égale ou inférieure à 50 mm ($5 d_b$). La plastification de l'acier survient pour une longueur d'ancrage de 100 mm ($10 d_b$) ou plus.

3.2.3 Longueur d'ancrage optimale

Le Tableau 3 montre que la force requise pour arracher une barre d'armature ISOROD du béton augmente en fonction de la longueur d'ancrage de la barre dans le béton.

À un certain point, la barre d'armature se rupture en traction avant qu'elle ne soit arrachée. La longueur de développement est définie comme étant la longueur minimale d'ancrage requise pour développer la résistance ultime en traction ($f_{fu} \cdot A$) de la barre, où f_{fu} est la résistance en traction et A est la section nominale de la barre (Figure 9).

La longueur de développement théorique pour les barres d'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone, comme définie par le manuel de l'ACI est calculée en utilisant l'Équation (2).

$$L_d = \frac{d_b f_{fu}}{18.5} \quad (2)$$

L_d : longueur de développement d'ancrage (mm), d_b : diamètre de l'armature (mm), f_{fu} : résistance en traction de l'armature (MPa).

Les résultats obtenus montrent que la longueur de développement d'ancrage calculée avec l'équation (2) est d'environ 3 fois supérieure à celle déterminée expérimentalement, ce qui est très conservateur en terme de désign.

3.3 ESSAIS DE FLEXION SUR DES DALLES UNIDIRECTIONNELLES EN BÉTON ARMÉ

Deux dalles unidirectionnelles (3200 mm x 1000 mm x 200 mm) en béton armé ont fait l'objet de ces essais. Une dalle a été armée entièrement à l'aide d'armature en matériaux composites

ISOROD et l'autre dalle entièrement d'armature d'acier. Chacune des deux dalles comportent deux nappes d'armature : une nappe supérieure et une nappe inférieure , pour simuler le cas de dalles de tabliers de ponts en béton.

La dalle en acier a été armée à l'aide d'une configuration d'armature couramment utilisée dans les dalles de tabliers de ponts en béton. Cette configuration d'armature est la suivante :

Nappe supérieure

Acier 15M@ 150 mm dans le sens de la longueur

Acier 15M@ 225 mm dans le sens de la largeur

Nappe inférieure

Acier 15M@ 150 mm dans le sens de la longueur

Acier 15M@ 225 mm dans le sens de la largeur

Nous avons considéré cette configuration d'armature d'acier comme faisant l'objet d'une dalle de tablier de pont en béton et nous avons calculé la configuration d'armature en matériaux composites correspondante conformément à la Clause 16.8.7 du nouveau Code canadien de calcul des ponts routiers (CHBDC, 2000). Pour la configuration d'armature en matériaux composites, nous avons opté pour l'armature ISOROD en fibre de verre pour la nappe supérieure et l'armature ISOROD en fibre de carbone pour la nappe inférieure. La configuration d'armature en matériaux composites calculée est la suivante :

Nappe supérieure

Armature en PRF ISOROD (verre) #5@ 150 mm dans le sens de la longueur

Armature en PRF ISOROD (verre) #5@ 165 mm dans le sens de la largeur

Nappe inférieure

3 barres d'armature ISOROD (carbone) #3 groupées @ 90 mm dans le sens de la largeur de la dalle

Armature ISOROD (verre) #5@ 165 mm dans le sens de la longueur de la dalle.

Aussi, les deux dalles en béton testées ont une épaisseur de 200 mm. Cette épaisseur est couramment utilisée en pratique pour les dalles de tabliers de pont en béton.

Le comportement des deux dalles est comparé en termes de déflexion, largeur des fissures et capacité ultime. Les figures 10 à 17 illustrent les configurations des armatures en acier et en matériaux composites utilisées pour les deux dalles.

3.3.1 Matériaux

Armatures ISOROD: des barres d'armature en matériaux composites à base de fibres de verre et de fibres de carbone ainsi que des armatures en acier ont été utilisées dans les dalles d'essais en laboratoire.

Armatures en acier : Les armatures en acier sont des barres N°15 (200 mm²), de nuance 400 W conformes à la norme CAN/CSA-G30.18-M..

Béton : Le béton utilisé pour les dalles est un béton normal couramment utilisé pour les tabliers de ponts en béton (béton de Type V du MTQ).

3.3.2. Identification des dalles en béton armé

Deux dalles de dimensions (3200 x 1000 x 200 mm) ont été testées au laboratoire. La dalle D-RF est renforcée avec des barres ISOROD à base de fibres de carbone et de verre, alors que la deuxième dalle D-AC est entièrement renforcée avec des barres d'armature conventionnelles.

La configuration d'armature des deux dalles a été décrite plus haut. Les Tableaux 6 et 7 présentent les configurations de renforcement des dalles D-RF et D-AC respectivement.

3.3.3 Instrumentation

L'instrumentation des dalles testées est composée de :

- 2 LVDTs installés à mi-portée de la dalle sur chaque côté pour la mesure de la déflexion ;
- 3 LVDTs parallèles au sens de la longueur de la dalle. Deux LVDT sont installés sur les barres et un troisième installé sur le béton pour mesurer le glissement des barres d'armature ;
- 7 jauges de déformation électriques installées sur la face supérieure de la dalle pour mesurer des déformations maximales que subit le béton ;
- 3 jauges de déformation électriques installées sur le parement de la dalle à mi-portée pour déterminer la position de l'axe neutre ;
- 15 jauges de déformation électriques pour la dalle D-RF et 11 jauges pour la dalle D-AC installées sur le renforcement pour l'étude de son comportement ;
- 2 LVDTs de haute précision installés sur les deux premières fissures pour mesurer l'ouverture de celles-ci.

Un système d'acquisition de données a été utilisé pour l'enregistrement des résultats des essais.

3.3.4 Montage expérimental et procédure d'essai

Les deux dalles en béton ont été soumises à des essais de flexion 4 points avec une portée libre de 3000 mm (Figure 23). Deux cycles de charge-décharge ont été effectués au début de l'essai de 0 KN à 57 KN qui représente 1,5 fois la charge de fissuration de la dalle (37 KN).

Le chargement des dalles a été effectué en utilisant un vérin MTS d'une capacité de 500 KN. Les taux de chargement étaient les suivants :

1,2 mm/min pour le chargement et 3 mm/min pour le déchargement

Les figures 18 à 24 montrent le montage expérimental et l'instrumentation des dalles unidirectionnelles.

3.3.5 Résultats et discussion

Dans le présent rapport, on présente les résultats sur le réseau de fissuration, les modes de rupture et le comportement en flexion des deux dalles testées. L'analyse est essentiellement une comparaison entre la dalle renforcée en acier et la dalle renforcée avec des barres d'armature en matériaux composites.

Fissuration

La Figure 25 montre et compare les largeurs de fissures mesurées pour les deux dalles testées D-RF et D-AC. Notons qu'au niveau des charges de service (≈ 100 KN), la largeur des fissures de la dalle D-RF est très proche de celle de la dalle D-AC armée de barres d'acier conventionnelles. On constate que la dalle D-RF est aussi rigide que la dalle D-AC du fait que le design a respecté une équivalence de rigidité pour l'utilisation des barres d'armatures en matériaux composite à base de

fibres de carbone dans la nappe inférieure. Le moment de fissuration expérimental est égale à 18,5 KN.m.

Déflexion

La Figure 26 présente les courbes charge-déflexion des deux dalles testées. Au niveau des charges de service (≈ 100 KN), la déflexion de la dalle D-RF est d'environ 12 mm, comparativement à 9 mm pour la dalle D-AC. A une charge de 170 KN qui représente la charge de plastification de l'acier, la déflexion de la dalle D-RF est d'environ 16 mm tandis qu'elle est d'environ 22 mm pour la dalle D-AC.

Déformation de l'armature et du béton

La Figure 27 présente les déformations dans le béton et les déformations des renforcements de la nappe inférieure des deux dalles testées en fonction de la charge appliquée. Cette figure montre que les deux dalles ont un comportement similaire et que les déformations dans le béton et dans les renforcements sont quasi identiques. Ceci est dû au fait que le design a respecté une équivalence de rigidité entre les armatures en PRF à base de fibres de carbone de la nappe inférieure de la dalle D-RF et les armatures en acier de la dalle D-AC.

Réseau de fissuration et mode de rupture

La Figure 28 montre la distribution des fissures et les modes de rupture des dalles testées. La rupture de la dalle D-RF a été causé simultanément par un écrasement du béton dans la zone de flexion pure suivie par un cisaillement (effet d'extrémité) au niveau de la nappe d'armature inférieure. La Figure 27 montre que le béton a atteint une valeur de 3500 $\mu\epsilon$ qui correspond à la

valeur limite de déformation dans le béton. Ce mode de rupture est dû à des déformations très importantes dans le béton causé par un niveau de charge très élevé (397 KN). Le mode de rupture de la dalle D-AC a été en flexion par plastification de l'acier, tel que prévu par la théorie. Le Tableau 9 résume les résultats des essais pour les deux dalles testées.

En conclusion, le comportement des deux dalles testées a été conforme à celui prédit par les théories de design, c'est à dire une rupture par plastification de l'acier pour la dalle armée de barres conventionnelles (dalle sous armée) et une rupture par écrasement du béton pour la dalle armée de barres ISOROD (dalle sur armée). La capacité ultime de la dalle D-RF est de 397 KN, ce qui est 2 fois plus élevée que celle de la dalle D-AC (200 KN).

Au niveau de charge de service, les deux dalles ont montré des réseaux de fissuration, des déflexion et des ouvertures de fissure très semblables.

CONCLUSION

Une nouvelle armature à béton en matériaux composites à base de fibre de carbone a été développée, optimisée et caractérisée en laboratoire en vue de son utilisation dans les tabliers de ponts en béton. Les essais de caractérisation en laboratoire comprenaient notamment des essais de traction, des essais de durabilité, des essais d'adhérence et des essais de flexion sur des poutres et des dalles unidirectionnelles en béton armé.

Les résultats obtenus ont montré que cette nouvelle armature possède des propriétés mécaniques et structurales plus que satisfaisantes et constitue une très bonne alternative à l'armature d'acier pour les tabliers de ponts et autres structures en béton armé. Cette nouvelle armature fait présentement l'objet d'une évaluation sur le terrain dans le cadre du contrat de recherche 1220-00-BD08 entre le ministère des Transports du Québec et l'Université de Sherbrooke portant sur

son utilisation dans la dalle du tablier du pont situé dans le Rang 6 de la municipalité de Wotton (Québec).

Les résultats décrits dans ce rapport ont été utilisés pour le design et l'établissement des plans et devis pour la dalle du tablier de ce pont qui est actuellement en cours de construction.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le ministère des Transports du Québec (Direction des Structures) pour le support financier de ce projet de recherche et la compagnie Pultrall Inc. pour avoir fourni l'armature en matériaux composites.

RÉFÉRENCES

- [1] Benmokrane B., and Rahman, H., (*eds.*) ``Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction``, Proceeding of the First International Conference, 1998, Sherbrooke, Québec, Canada, 692p.
- [2] Japan Concrete Institute, (*ed.*), ``Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures``, Proceeding of the third International Symposium (FRPRCS-3), 1997, Sapporo Japan, vol. 1, 728p.
- [3] Saadatmanesh H., and Ehsani M.R., (*eds.*) ``International Conference on Composites for Infrastructure``, Proceeding ICCI, 1996, Tucson, Arizona, USA.
- [4] Neale K.W., and Labossière P., (*eds.*), ``Advanced Composite Materials in Bridges and Structures``, Proceeding of the First International Conference, (1992), Sherbrooke, Québec, Canada.
- [5] GangaRao H.V.S., Thippesway H.K., Kumar S. V., and Franco J.M., `` Design, Construction and Monitoring of the First FRP Reinforced Concrete Bridge Deck in the United States``, Proceedings of the third International Symposium (FRPRCS 3) on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 1997, Sapporo, Japan, vol. 1, pp. 647-656.
- [6] Rizkalla S., Shehata E., and Abdelrahman A., ``Design and Construction of a Highway Bridge Reinforced for Shear and Prestressed by CFRP``, American Concrete Institute Seminar on Field Applications of FRP Reinforcement to Concrete: Parts I and II, 1998, Atlanta, Georgia, 5p.

- [7] Rizkalla S., and Tadros G., `` First Smart Bridge in Canada `` , ACI Concrete International, Vol. 16., No. 6, June 1994, pp. 42-44.
- [8] Benmokrane, B., Zhang, B., Laoubi, K., Tighiouart, B., and Lord I., (2001). `` Mechanical and bond properties of new generation CFRP reinforcing bars for concrete structures,`` Proceedings of the CSCE 29th Annual conference, Victoria. BC, Canada, CSCE, May 30-June 2, A11.
- [9] Hassan T., Rizkalla S., Abdelrahman A., and Tadros G., `` Design Recommendations for Bridge Deck Slabs Reinforced by Fiber Reinforced Polymers``, Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymers Reinforcement for Reinforced concrete structures, ACI-SP-188, 1999, Baltimore, USA, pp. 313-
- [10] CHBDC, Canadian Highway Bridge Design Code, CAN/CSA-S6-00, Published in December 2000 by CSA International, Rexdale, Toronto, Ontario, Canada, 734 p.
- [11] American Concrete Institute (ACI) ``Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars``, ACI 440.1R-01, 2000, ACI Farmington Hills, Michigan, 41 p.
- [12] Laoubi, K., Lord, I., Robert, J.F., Masmoudi, R., Benmokrane, B. ``Renforcement de la dalle du tablier à l'aide de l'armature en matériaux composites à base de fibres de carbone Isorod``, Rapport d'étape soumis au ministère des Transports du Québec, mars 2000, Contrat 1220-99-BD02, 33p.

Tableau 1 Propriétés en traction de l'armature en fibre de carbone ISOROD optimisée
(Résultats de 10 essais)

Type de barre	Diamètre nominal (mm)	Section (mm ²)	Charge à la rupture (kN)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Déformation ultime (%)	Coef de Poisson (%)
Carbone	9,5	71	109 ± 4	1536 ± 61	128 ± 5 (114 ± 4)	1,2 ± 0,0	0,26 ± 0,02

Note:

Les valeurs des modules d'élasticité entre parenthèses ont été obtenues à partir des jauges résistives;

Les déformations ultimes ont été calculées en divisant la résistance à la traction ultime par le module d'élasticité

Tableau 2 Caractéristiques des essais d'arrachement (propriétés d'adhérence)

Serie No.	Type de barre	Diamètre (mm)	Longueur d'ancrage (mm)	Nombre d'échantillons
10C05	Carbone (C)	9,5	50	4
10C10			100	4
10C15			150	4
10C20			200	4
10C30			300	4
10S05	Acier (S)	11,3	50	2
10S10			100	2
10S15			150	2
10S20			200	2
10S30			300	2

Tableau 3 Résultats des essais d'arrachement de barres d'armature noyées dans le béton

Longueur d'ancrage (mm)	Charge d'arrachement maximale (kN)	Contrainte à l'adhérence maximum (MPa)	Mode de rupture
<i>Barres ISOROD optimisée</i>			
50 (5d _b)	29,9 ± 1,8	20,0 ± 1,2	Rupture par arrachement
100 (10d _b)	53,5 ± 3,5	17,9 ± 1,2	Rupture par arrachement
150 (15d _b)	75,6 ± 4,9	16,6 ± 1,1	Rupture par arrachement
200 (20d _b)	107,0 ± 7,7	18,9 ± 1,4	Rupture en traction
300 (30d _b)	101,8 ± 10,4	11,9 ± 1,3	Rupture en traction
• <i>Barres en acier</i>			
50 (5d _b)	43,6 ± 4,8	24,6 ± 2,1	Rupture par arrachement
100 (10d _b)	53,8 ± 1,7	15,2 ± 1,0	Rupture par arrachement /plastification
150 (15d _b)	55,1 ± 4,9	16,6 ± 1,1	Plastification
200 (20d _b)	48,1 ± 2,3	6,8 ± 0,5	Plastification
300 (30d _b)	50,8 ± 3,2	4,8 ± 0,3	Plastification

Tableau 4 Armature de renforcement pour la dalle D-RF (armature ISOROD)

Localisation	Rapport de renforcement	Type	Diamètre en mm (Section en mm ²)
Nappe supérieure Sens de la largeur	$\rho = 0,60\%$ (#5@165 mm)	ISOROD Fibres de Verre	15,875 (198)
Nappe supérieure Sens de la longueur	$\rho = 0,67\%$ (#5@150 mm)	ISOROD Fibres de Verre	15,875 (198)
Nappe inférieure Sens de la largeur	$\rho = 0,60\%$ (#5@165 mm)	ISOROD Fibres de Verre	15,875 (198)
Nappe inférieure Sens de la longueur	$\rho = 1,16\%$ (3#3@90 mm)	ISOROD Fibres de Carbone	9,525 (71)

Tableau 5 Armature de renforcement pour la dalle D-AC (armature en acier)

Localisation	Rapport de renforcement	Type	Diamètre en mm (Section en mm ²)
Nappe supérieure Sens de la largeur	$\rho = 0,45\%$ (15M@225 mm)	Acier	15,6 (200)
Nappe supérieure Sens de la longueur	$\rho = 0,67\%$ (15M@150 mm)	Acier	15,6 (200)
Nappe inférieure Sens de la largeur	$\rho = 0,45\%$ (15M@225 mm)	Acier	15,6 (200)
Nappe inférieure Sens de la longueur	$\rho = 0,67\%$ (15M@150 mm)	Acier	15,6 (200)

Tableau 6 Résultats des essais de flexion des deux dalles testées

Dalle	Type de renforcement	Charge ultime KN	Largeur de fissure maximum mm	Déflexion maximum mm	Mode de rupture
D-AC	Acier	227	1,2	49,7	Plastification de l'acier
D-RF	ISOROD	397	0,53	56,3	Écrasement du béton

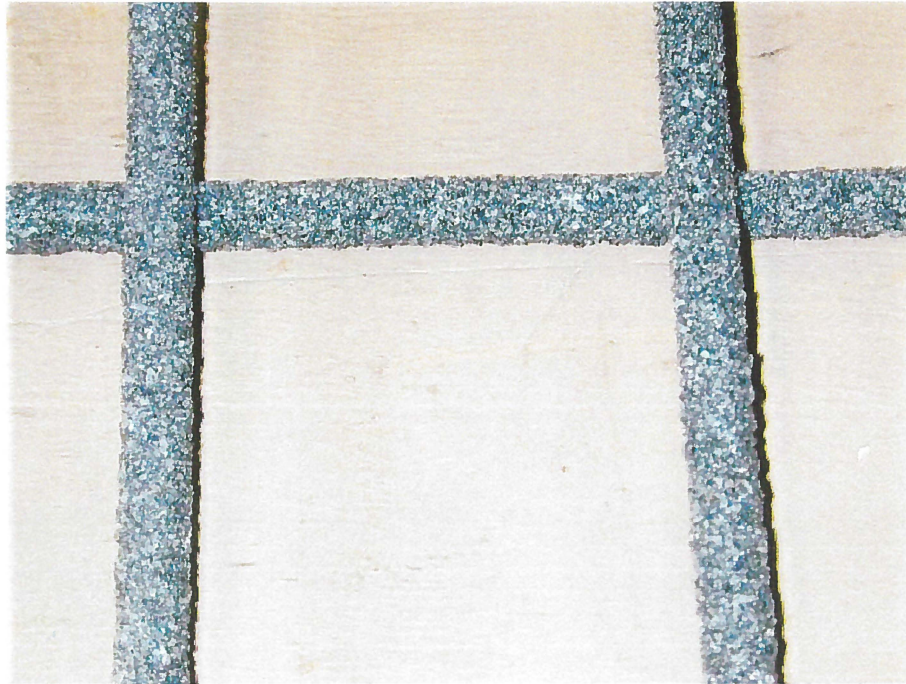


Figure 1 Vue de la barre d'armature ISOROD en fibre de carbone optimisée

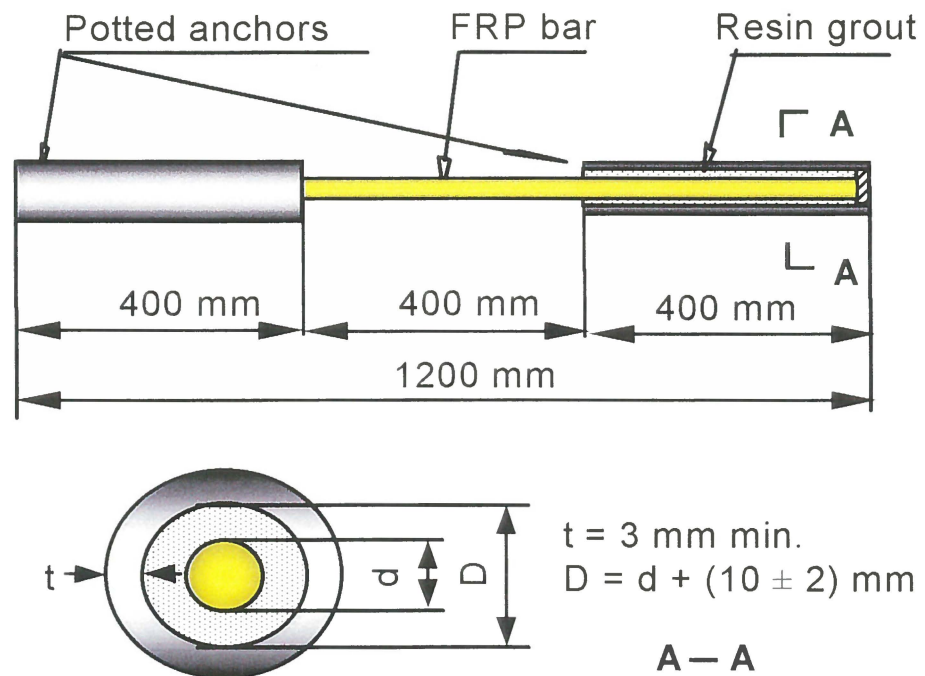


Figure 2 Détails géométriques d'un échantillon pour l'essai de traction

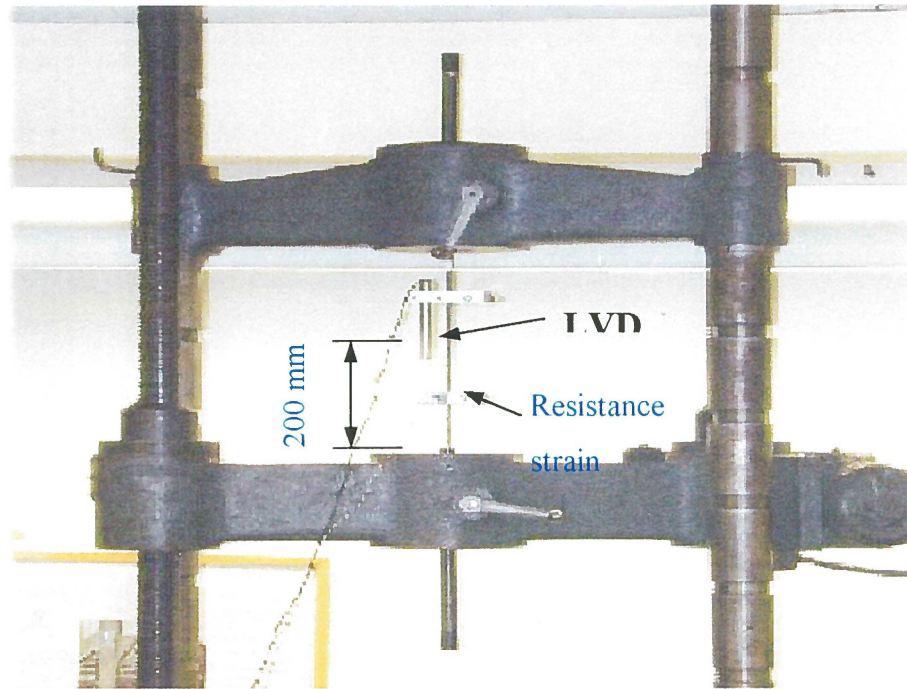


Figure 3. Vue du montage de l'essai de traction

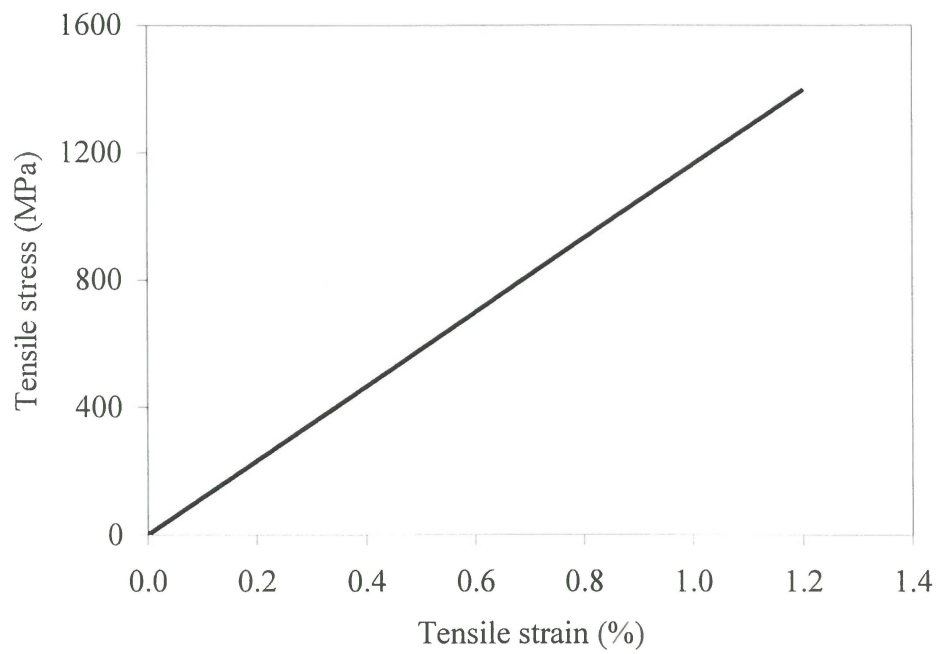


Figure 4 Courbe contrainte de traction-déformation uniaxiale de la barre d'armature ISOROD en fibre de carbone optimisée



Figure 5 Modes de rupture en traction de l'armature

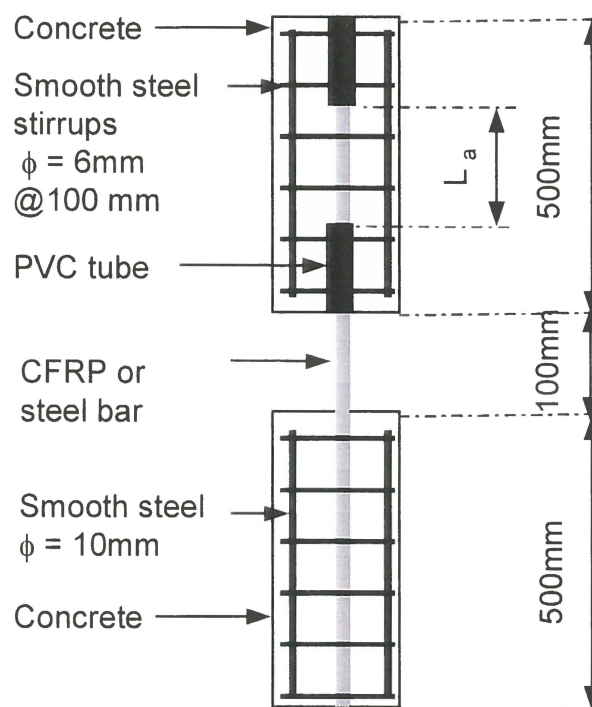


Figure 6 Détails géométriques des échantillons pour les essais d'arrachement

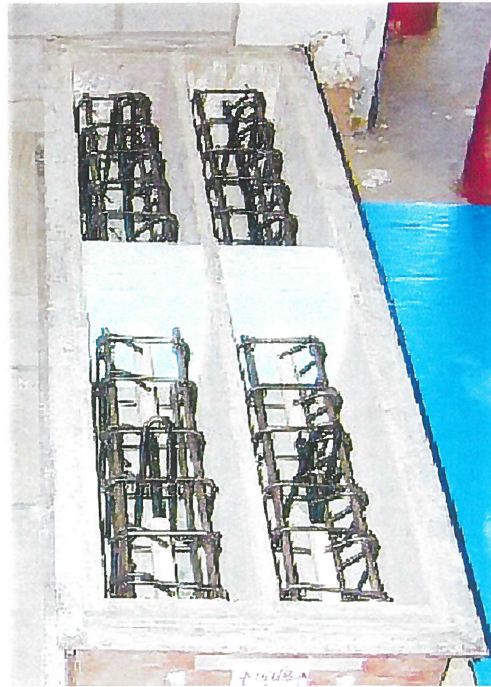


Figure 7 Vue montrant des échantillons pour les essais d'arrachement



Figure 8 Vue du montage utilisé pour les essais d'arrachement

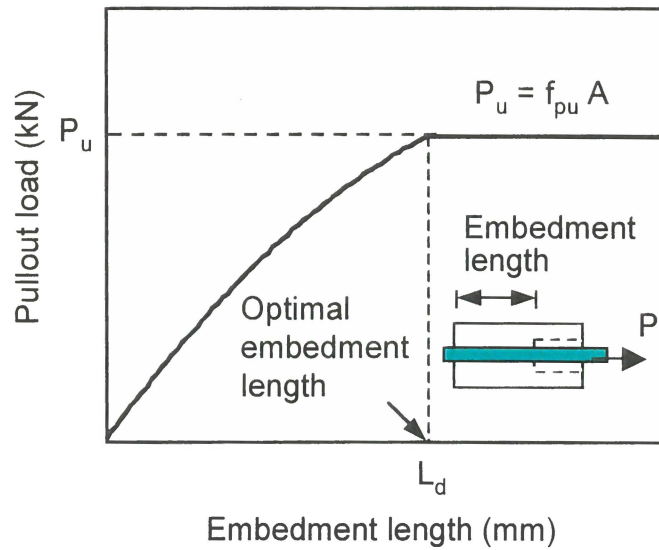


Figure 9 Longueur optimale d'ancrage



Figure 10 Vue de l'armature conventionnelles utilisées dans les dalles

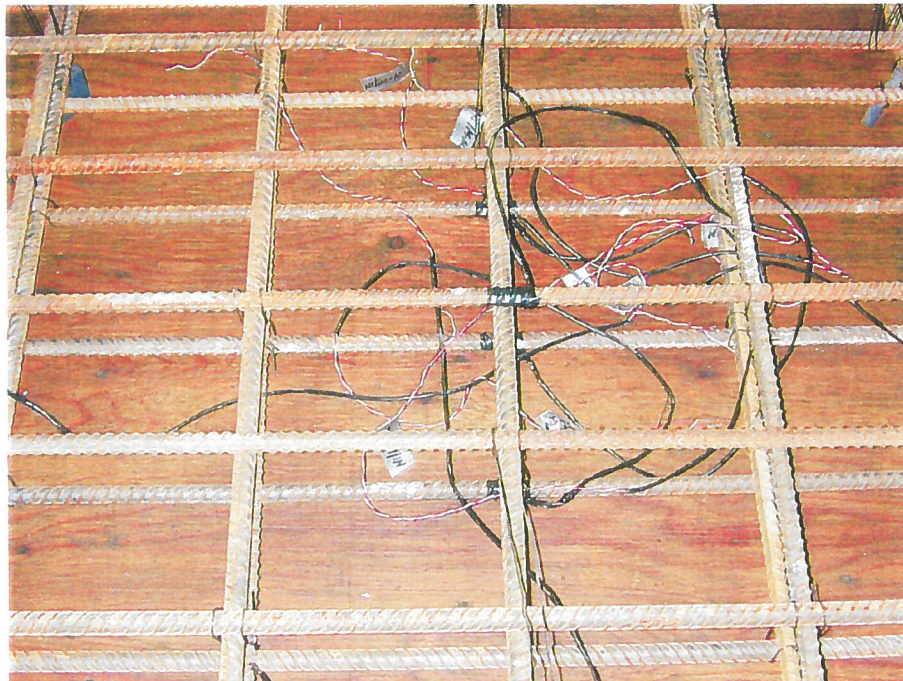


Figure 11 Vue rapprochée des 2 nappes d'armature en acier utilisés dans les dalles



Figure 12 Vue d'un lit d'armature en matériaux composites utilisé dans les dalles

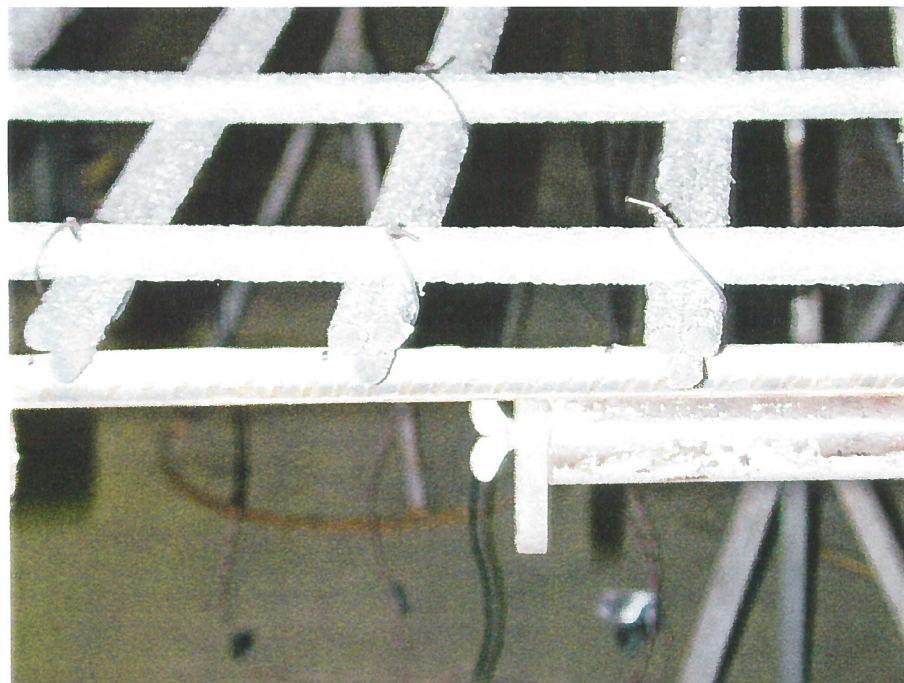


Figure 13 Vue rapprochée d'un lit d'armature en matériaux composites utilisé dans les dalles (ISOROD)



Figure 14 Vue rapprochée de l'armature en matériaux composites (Isorod)

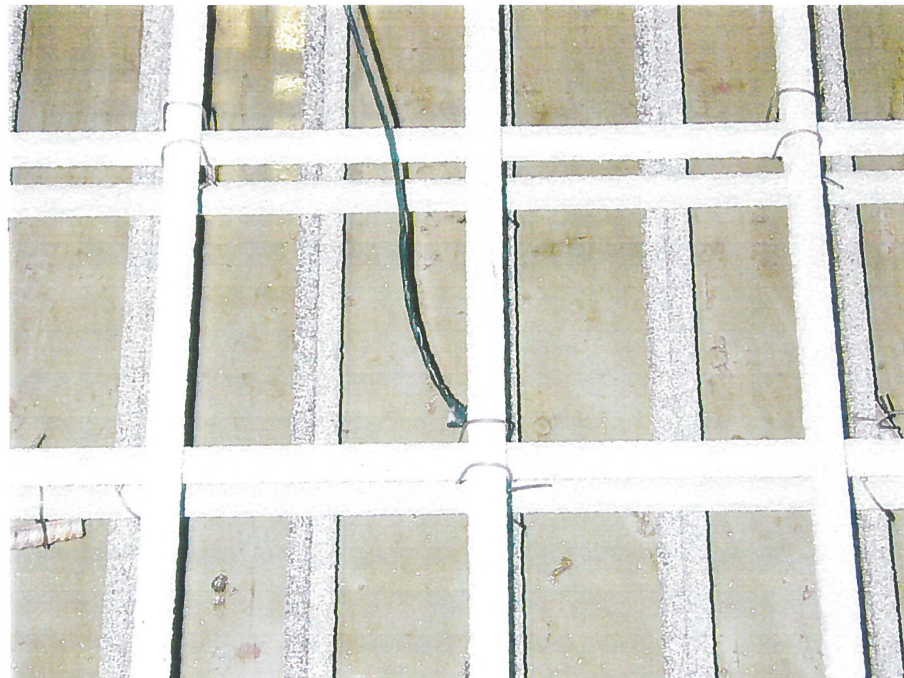


Figure 15 Vue rapprochée des 2 nappes (supérieure et inférieure) d'armature en matériaux composites utilisé dans les dalles



Figure 16 Vue du coffrage d'une dalle avec les 2 nappes d'armature (supérieure et inférieure)

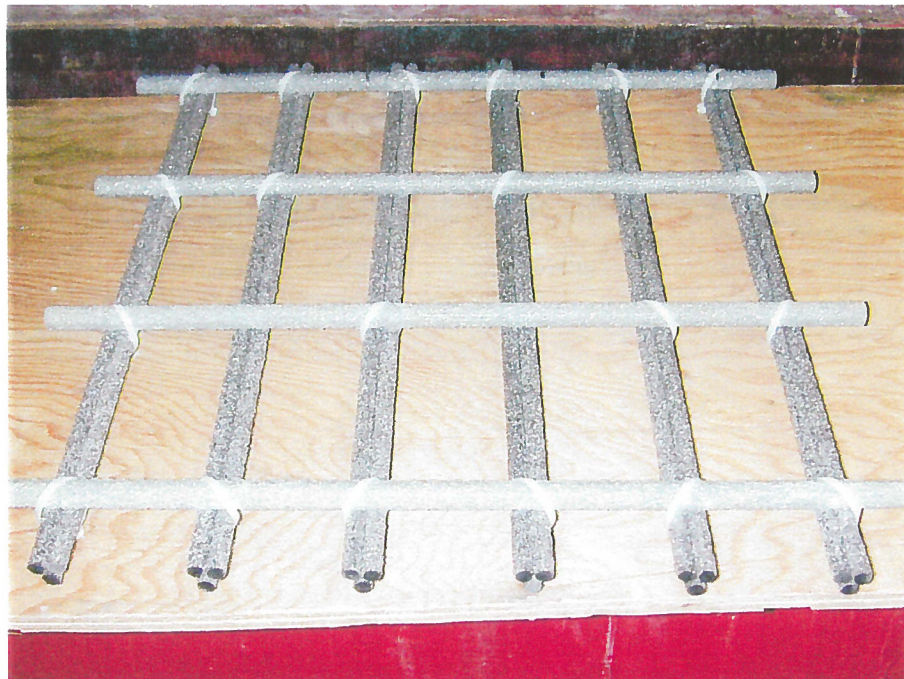


Figure 17 Vue rapprochée montrant 3 barres d'armature longitudinales assemblées

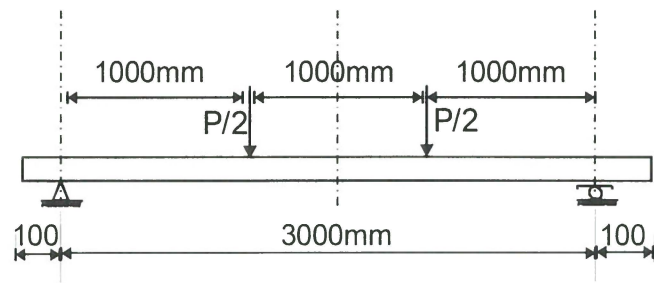


Figure 18 Essai de flexion 4 points



Figure 19 Vue du montage expérimental utilisé lors des essais de flexion des dalles

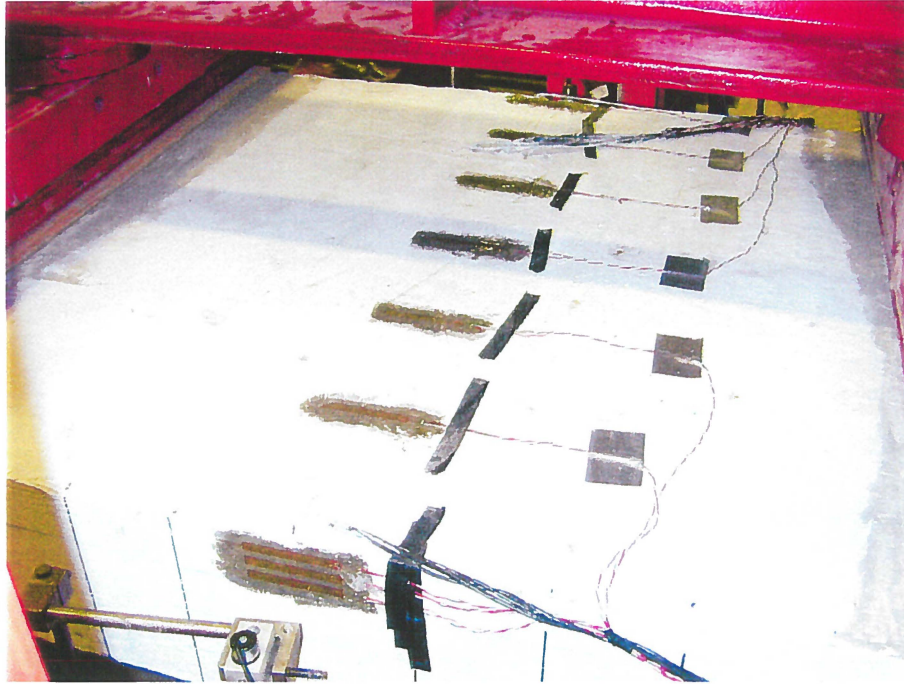


Figure 20 Vue de l'instrumentation de la face comprimée du béton des dalles

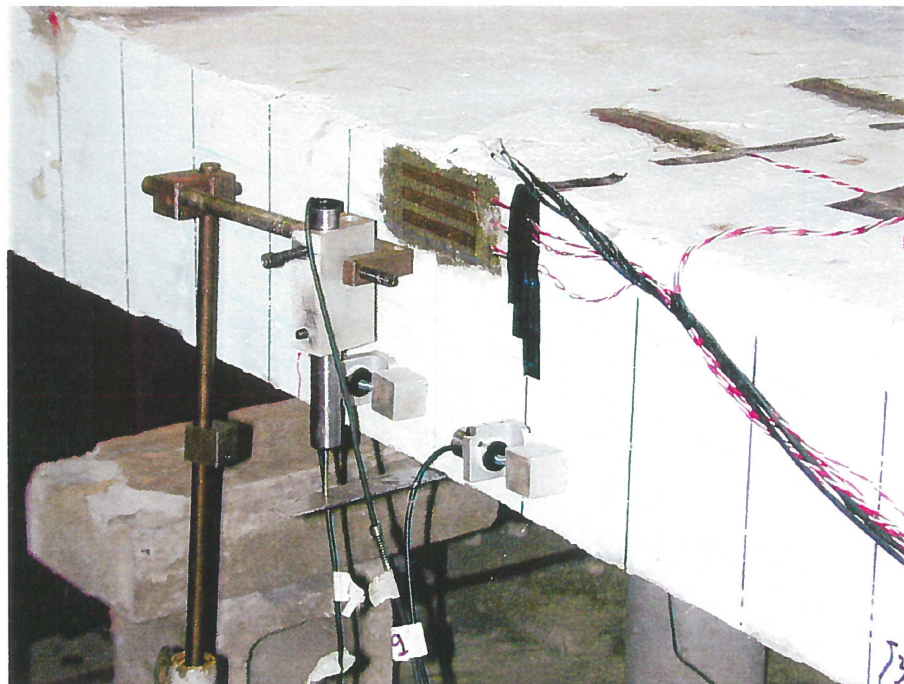


Figure 21 Vue montrant les LVDTs pour la mesure de la largeur des fissures et de la déflexion au centre de la portée

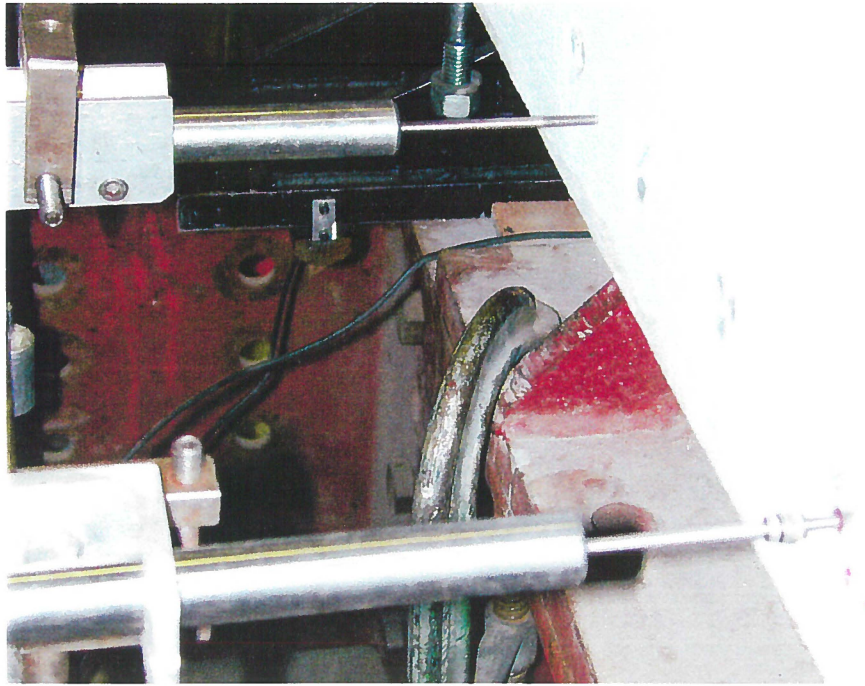


Figure 22 LVDTs positionnés aux bout des barres d'armature ISOROD pour mesurer le glissement s'il y a lieu

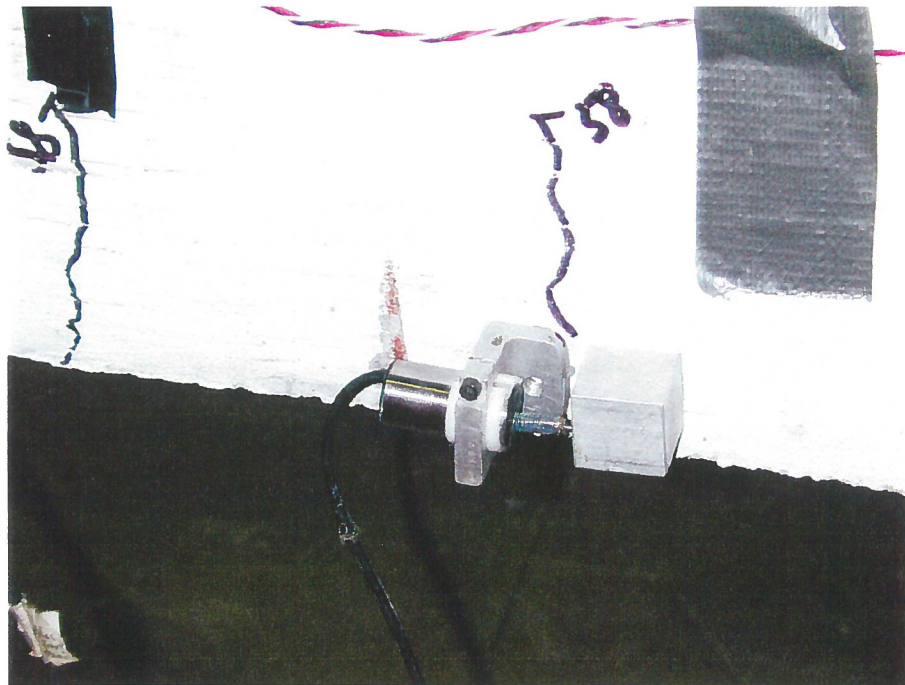


Figure 23 Vue rapprochée du LVDT de haute résolution pour la mesure de la largeur des fissures

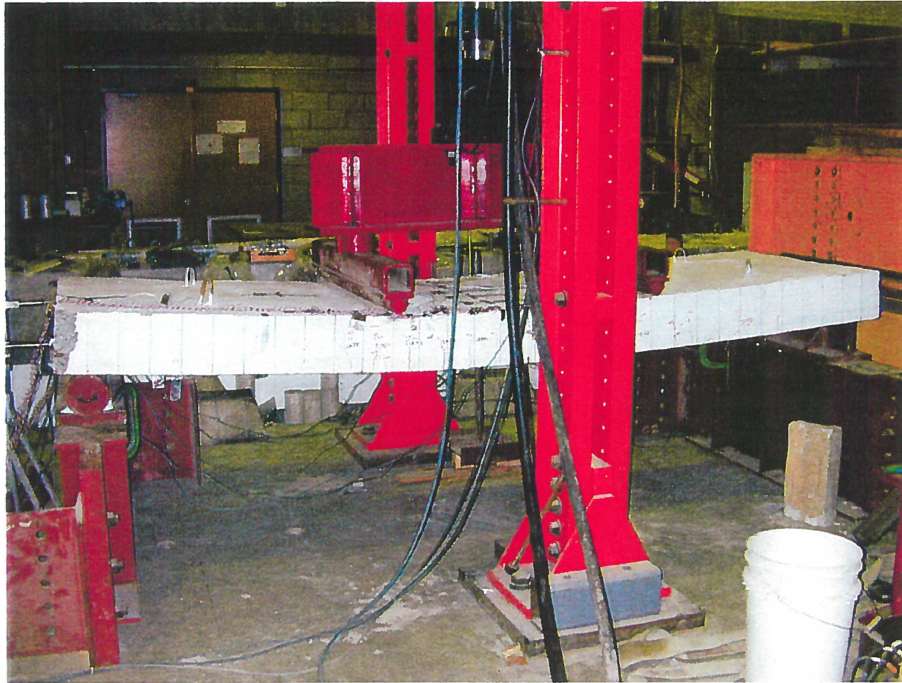


Figure 24 Vue de la dalle armée de barres ISOROD en cours d'essai

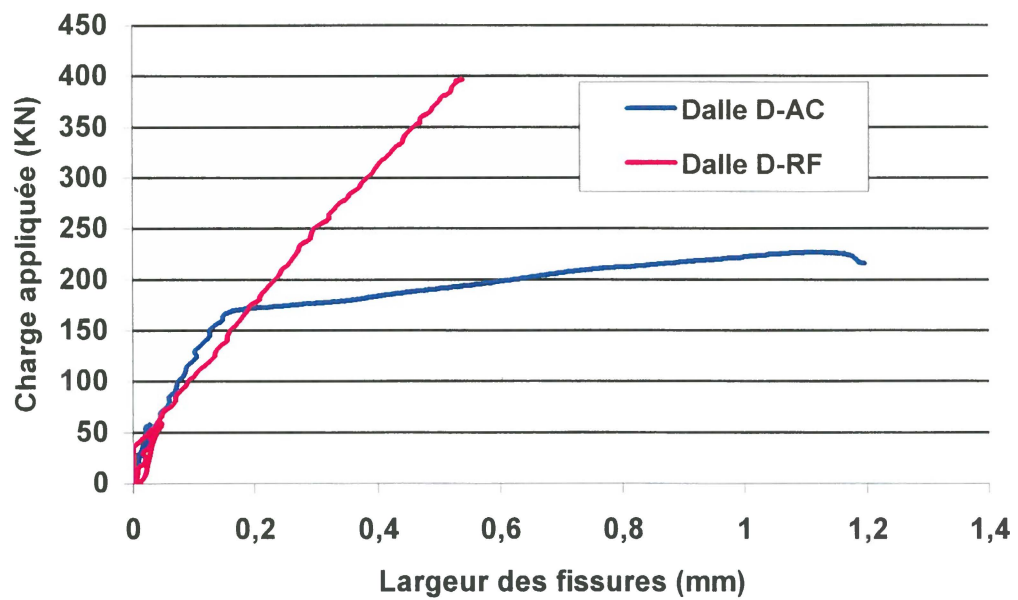


Figure 25 La largeur des fissures en fonction de la charge appliquée

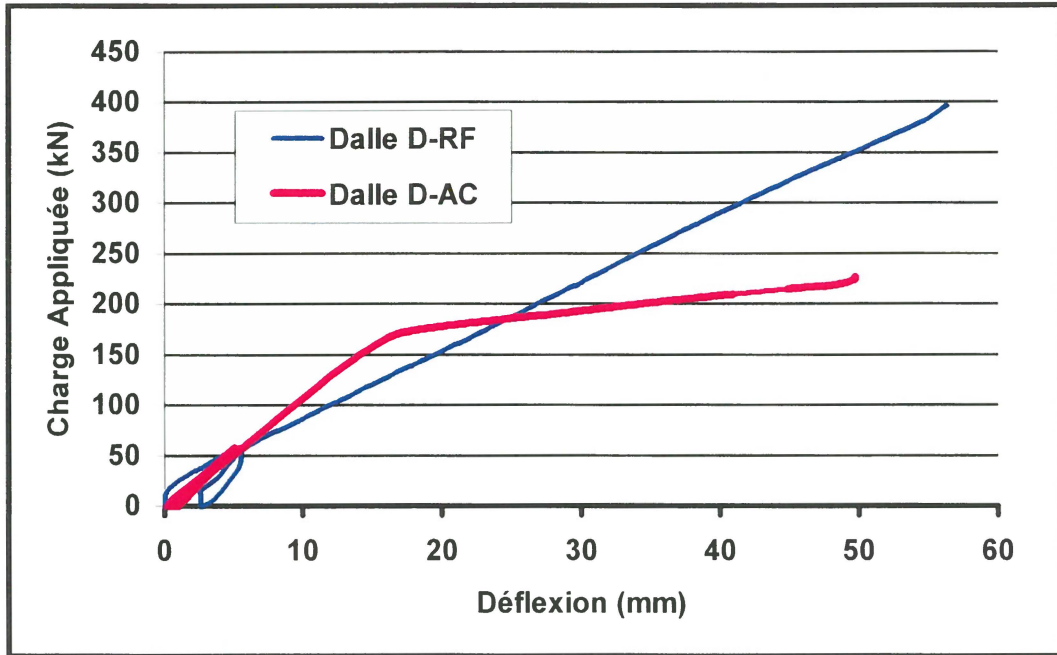


Figure 26 Courbes de la déflexion en fonction de la charge appliquée

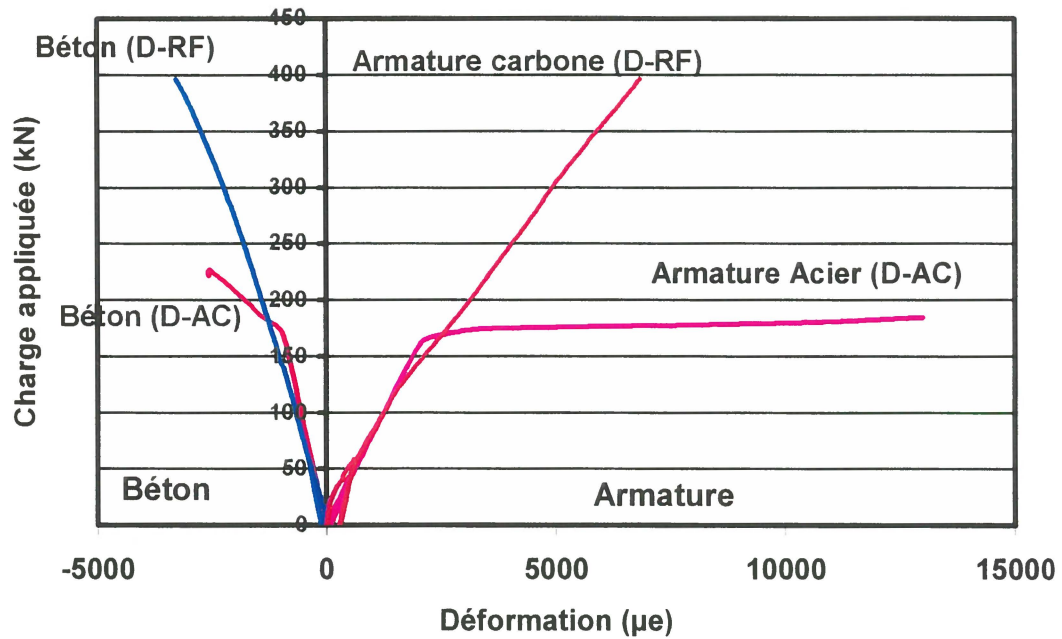


Figure 27 Déformations types de l'armature et du béton

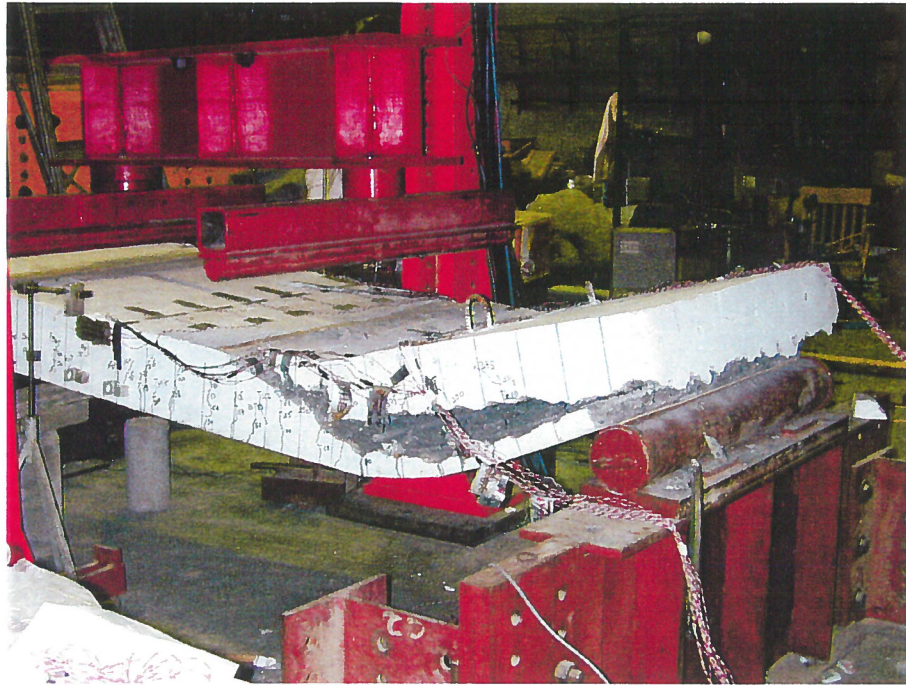


Figure 28 Mode de rupture de la dalle armée de barres ISOROD

MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 184 861