



UNIVERSITÉ DE

**SHERBROOKE**

Ministère des Transports, de la Mobilité durable  
et de l'Électrification des transports

**Contrat de recherche R763.1**

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

## **Développement d'un nouveau protocole d'essais de caractérisation mécanique de barres d'armature en polymère renforcé de fibre (PRF) pour les barres courbes**

**Rapport technique final**

**Préparé par:**

**Kévin Répécaud, Khaled Mohamed et Brahim Benmokrane, ing., Ph.D.**

Chaire de recherche du CRSNG « Renforcements de PRF innovateurs  
pour les infrastructures en béton »

Département de génie civil

Université de Sherbrooke

Sherbrooke, Quebec

CANADA J1K 2R1

Phone: (819) 821-7758

Fax: (819) 821-7974

E-mail: [Brahim.Benmokrane@USherbrooke.ca](mailto:Brahim.Benmokrane@USherbrooke.ca)

**Soumis à:**

**Marc-Antoine Loranger et Claude Nazair**

Secteur matériaux synthétiques et essais spéciaux

Direction des matériaux d'infrastructures

Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports

2700, rue Einstein

Québec, G1P 3W8

Téléphone: (418) 644-0181 poste 2257

12 février 2018 – **RÉVISÉ LE 24 mars 2018**

# RÉSUMÉ

Les barres d'armature en polymères renforcés de fibres (PRF) sont de plus en plus utilisées dans les structures en béton armé. Ces matériaux composites présentent en effet des caractéristiques mécaniques et physiques avantageuses par rapport aux barres d'armature traditionnelles en acier. Toutefois, un inconvénient notable de ces matériaux concerne la fabrication des barres d'armature courbes. En effet, la partie courbe d'une barre en PRF est une zone où la résistance en traction est plus faible par rapport à la résistance qui peut être atteinte dans une barre rectiligne. Il est donc primordial d'évaluer les propriétés mécaniques des barres courbes en PRF à l'aide de méthodes d'essais fiables. Cependant, les méthodes d'essais standards existantes restent perfectibles car elles sont peu pratiques à mettre en place et leur fiabilité est discutable. Par conséquent, l'objectif principal de ce projet de recherche est de développer une nouvelle méthode d'essai pour mesurer la résistance en traction de la partie courbée des barres d'armature courbes en PRFV. Cette nouvelle méthode d'essai se doit d'être pratique à mettre en œuvre et doit fournir des résultats précis et fiables.

À la demande du MTMDET, un programme expérimental a donc été mis en œuvre afin de développer et valider un nouveau protocole d'essais. Dans un premier temps, des essais physiques ont permis de s'assurer de la conformité des matériaux et de comparer les propriétés physiques dans la partie courbe des barres avec celles dans la partie rectiligne. Les barres testées ont été fournies par cinq fabricants différents qui utilisent des procédés de fabrication différents. Les essais physiques ont permis de démontrer que les propriétés dans la partie courbe des barres en PRFV sont similaires à celles dans la partie rectiligne.

Des essais mécaniques ont ensuite été conduits pour déterminer les paramètres expérimentaux de la nouvelle méthode d'essai. De nombreux spécimens ont été testés en étudiant l'influence de différentes variables. Les spécimens qui ont été développés pour la nouvelle méthode d'essai comportent une seule barre en PRF en forme de L, qui est ancrée dans un bloc monolithique de béton. Le dispositif expérimental est constitué d'un vérin hydraulique qui applique une charge de traction sur la barre en PRF, ainsi qu'une cellule de charge qui mesure la force appliquée. À l'issue des essais mécaniques, il s'est avéré que le type de barre influençait le mode de rupture et la résistance dans la partie courbe des barres. Les résultats obtenus lors des différentes phases d'essais ont toutefois permis de valider la configuration des spécimens de test et le dispositif expérimental.

Finalement, une étude numérique a été conduite afin de comprendre plus en détail le comportement d'un spécimen testé avec la nouvelle méthode d'essai. La modélisation par éléments finis a permis d'examiner la répartition des contraintes au sein de la barre en PRFV et du bloc de béton. Les résultats obtenus avec le modèle par éléments finis sont similaires à ceux obtenus expérimentalement. Les résultats de l'étude numérique ont permis de valider les paramètres expérimentaux de la nouvelle méthode d'essai.

**Mots-clés :** PRFV ; barres d'armature courbes ; propriétés physiques et mécaniques ; méthode d'essai ; modélisation par éléments finis

# TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1	INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 2	CONTEXTE .....	3
2.1	Groupe de recherche .....	3
2.2	Barres d'armature courbes en PRFV .....	3
2.2.1	Utilisation des PRF dans les structures en béton .....	4
2.2.2	Composition des matériaux en PRF .....	4
2.2.3	Types de barres d'armature en PRFV .....	4
2.2.4	Procédés de fabrication des barres d'armatures en PRFV .....	5
2.3	Problématique .....	7
2.4	Objectifs .....	8
2.5	Méthodologie .....	9
CHAPITRE 3	ÉTAT DE L'ART .....	10
3.1	Méthodes d'essai existantes .....	10
3.1.1	Méthode d'essai B.5 .....	10
3.1.2	Méthode d'essai B.12 .....	13
3.1.3	Comparaison des méthodes d'essai B.5 et B.12 .....	14
3.2	Recherches sur la résistance des barres courbes en PRF .....	15
3.2.1	Étude précurseur avec des matériaux artisanaux .....	15
3.2.2	Etude de l'ancrage des barres d'armature courbes en PRFV .....	16
3.2.3	Étude des paramètres de la méthode d'essai B.5 .....	17
3.2.4	Étude de la résistance de lamelles courbes en PRFV .....	19
3.3	Bilan de l'état de l'art .....	20
CHAPITRE 4	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES .....	21
4.1	Teneur en fibres .....	21
4.2	Coefficient d'expansion thermique .....	22
4.3	Température de transition vitreuse .....	23
4.4	Taux de cure .....	24
4.5	Test de pénétration de colorant .....	27
4.6	Bilan des essais physiques .....	28
CHAPITRE 5	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES .....	29
5.1	Présentation de la nouvelle méthode d'essai .....	29
5.1.1	Préparation des spécimens .....	29
5.1.2	Dispositif expérimental .....	32
5.1.3	Détermination de la résistance dans la partie courbe .....	33
5.2	Organisation des essais mécaniques .....	33
5.2.1	Paramètres étudiés .....	33
5.2.2	Programme expérimental .....	35
5.2.3	Validation de la fiabilité des résultats .....	37
5.2.4	Influence du type de barre sur le mode de rupture et la résistance .....	39
5.2.5	Influence du renforcement du bloc de béton .....	43
5.2.6	Influence de la longueur d'ancrage .....	45

5.2.7	Utilisation d'un béton haute performance à prise rapide.....	48
5.2.8	Influence du diamètre de la barre .....	50
5.2.9	Influence du taux de chargement.....	51
5.2.10	Répartition des contraintes le long de la barre .....	52
5.2.11	Comparaison des méthodes d'essai .....	53
5.3	Bilan des essais mécaniques .....	55
<b>CHAPITRE 6 ÉTUDE NUMERIQUE .....</b>		<b>58</b>
6.1	Présentation de l'étude numérique .....	58
6.2	Paramètres du modèle.....	58
6.2.1	Géométrie .....	58
6.2.2	Conditions limites et chargement .....	59
6.2.3	Propriétés des matériaux.....	60
6.2.4	Maillage et types d'éléments .....	62
6.2.5	Interface entre la barre en PRFV et le béton .....	63
6.2.6	Paramètres d'analyse .....	66
6.3	Analyse des résultats .....	67
6.3.1	Influence du modèle d'interface entre la barre et le béton .....	67
6.3.2	Relation force-déplacement.....	67
6.3.3	Répartition des contraintes .....	68
6.4	Bilan de l'étude numérique.....	70
<b>CHAPITRE 7 CONCLUSION.....</b>		<b>72</b>
<b>ANNEXE A PROGRAMME EXPÉRIMENTAL .....</b>		<b>74</b>
<b>ANNEXE B COMPOSITION DES BÉTONS .....</b>		<b>75</b>
B.1	Béton normal .....	75
B.2	Béton à prise rapide .....	75
<b>ANNEXE C INTERFACE BARRE-BÉTON.....</b>		<b>76</b>
C.1	Relation adhérence-glissement avec le <i>BPE Modified Model</i> .....	76
C.2	Distribution de la relation adhérence-glissement .....	77
<b>REFERENCES .....</b>		<b>78</b>

# LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 – Types de barres d’armature en PRFV .....	5
Figure 2.2 - Types de barres en PRFV courbes utilisées dans le cadre de cette étude .....	6
Figure 2.3 - Contraintes dans la partie courbe de l’armature .....	8
Figure 2.4 - Orientation des fibres dans la partie courbe d’une barre en PRFV .....	8
Figure 3.1 - Dispositif d’essai pour la méthode d’essai B.5 .....	11
Figure 3.2 - Configuration de l’éprouvette pour la méthode d’essai B.5 .....	12
Figure 3.3 - Dispositif d’essai pour la méthode d’essai B.12 .....	14
Figure 3.4 - Dispositif expérimental utilisé par Maruyama et al. ....	16
Figure 3.5 – Spécimen et dispositif expérimental utilisés par Ehsani et al. ....	17
Figure 3.6 - Configuration des spécimens testés par Imjai et al. ....	19
Figure 4-1 - Exemple de courbe thermique obtenue par DSC .....	26
Figure 4-2 - Tests de pénétration de colorant .....	28
Figure 5-1 - Configuration d’un spécimen de test utilisé pour la nouvelle méthode d’essai .....	29
Figure 5-2 - Barre en PRFV munie d’un tube de préhension et d’un tube de dé-liaisonnement .....	30
Figure 5-3 - Disposition des barres dans les coffrages .....	31
Figure 5-4 - Types d’anses utilisées pour la manutention des blocs de béton .....	31
Figure 5-5 - Dispositif expérimental de la nouvelle méthode d’essai .....	32
Figure 5-6 – Courbe force-déplacement (barres #5 de type A avec $ld^* = 12d$ ) .....	39
Figure 5-7 - Rupture dans la partie courbe près de la jonction avec la partie rectiligne .....	39
Figure 5-8 - Rupture du bloc de béton lors d’un essai .....	40
Figure 5-9 - Fissures longitudinales dans la partie courbe des barres de type D .....	41
Figure 5-10 - Etat de la surface du béton en contact avec la partie courbe .....	41
Figure 5-11 - Relation force-déplacement (barres #5, $ld^* = 12d$ ) .....	43
Figure 5-12 - Relation force-déplacement (barres #6 de type B, avec et sans renforcement) .....	44
Figure 5-13 - Relation force-déplacement (barres #6 de type D, avec et sans renforcement) .....	45
Figure 5-14 - Mode de rupture des barres #6 de types B et D, avec renforcement du bloc de béton .....	45
Figure 5-15 - Relation force-déplacement pour différentes longueurs d’ancrage (barres #5 de type D) .....	48

Figure 5-16 – Préparation et coulée du béton haute performance à prise rapide .....	49
Figure 5-17- Rupture de barres coulée avec béton haute performance à prise rapide.....	50
Figure 5-18 - Mode de rupture des barres #4 et #3 .....	50
Figure 5-19 - Blocs de béton brisés suite à l'essai de barres #8 .....	51
Figure 5-20 - Emplacement des jauges de déformation le long de la barre .....	52
Figure 5-21 - Relations contrainte-déformation le long de barres testées avec la nouvelle méthode d'essai .....	53
Figure 6-1 - Dimensions du modèle .....	59
Figure 6-2 - Conditions aux limites et chargement .....	59
Figure 6-3 - Orientation des propriétés du PRFV le long de la barre.....	60
Figure 6-4 - Courbe contrainte-déformation du béton.....	62
Figure 6-5 - Maillage du modèle .....	62
Figure 6-6 - Relation exponentielle entre la pression de contact et l'écart entre les surfaces ...	63
Figure 6-7 - Réparation des contraintes dans la partie courbe de la barre.....	64
Figure 6-8 - Principe de fonctionnement des connecteurs axiaux en translation .....	65
Figure 6-9 - Relations adhérence-glisement .....	65
Figure 6-10 - Position des connecteurs (vue en coupe).....	66
Figure 6-11 - Courbe force-déplacement (modélisation par éléments finis).....	67
Figure 6-12 - Contraintes dans la barre en PRFV .....	68
Figure 6-13 - Contraintes dans le bloc de béton .....	69
Figure B.0-1 - BPE Modified Model.....	76
Figure B.0-2 - Répartition des connecteurs .....	77

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 - Teneur en fibres des barres de type A, B et C (ASTM D2584) .....	22
Tableau 4.2 - Teneur en fibres des barres de type E (ASTM D2584) .....	22
Tableau 4.3 - Coefficient d'expansion thermique transversal des barres de type A, B, C et D (ASTM E831) .....	23
Tableau 4.4 - Température de transition vitreuse (ASTM E1356) .....	24
Tableau 4.5 - Taux de cure (CSA S807-Annex A) .....	26
Tableau 5.1 - Résultats des essais avec la méthode B.5 .....	37
Tableau 5.2 - Résultats de la première phase d'essais avec la nouvelle méthode .....	37
Tableau 5.3 - Résultats de la deuxième phase d'essais avec la nouvelle méthode .....	38
Tableau 5.4 - Résultats de la troisième phase d'essais avec la nouvelle méthode .....	38
Tableau 5.5 - Résistance dans la partie courbe des barres #5, $ld * = 12d$ .....	42
Tableau 5.6 - Résistance dans la partie courbe des barres #6 .....	43
Tableau 5.7 - Résistance dans la partie courbe pour différentes longueurs d'ancrage .....	47
Tableau 5.8 - Résistance des spécimens avec un béton haute performance à prise rapide .....	48
Tableau 5.9 - Résistance dans la partie courbe pour différents diamètres de barre .....	50
Tableau 5.10 - Résistance dans la partie courbe pour différents taux de chargement .....	52
Tableau 5.11 - Comparaison des résultats entre la méthode d'essai B.5 et la nouvelle méthode d'essai .....	54
Tableau 6.1 – Propriétés mécaniques du PRFV .....	60
Tableau A.0.1 - Programme expérimental .....	74
Tableau B.1 - Paramètres du BPE Modified Model .....	76
Tableau B.2 - Surface d'influence des connecteurs .....	77

# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les barres d'armature en polymères renforcés de fibres (PRF) sont de plus en plus utilisées dans les ouvrages et infrastructures en béton armé. Ces matériaux composites présentent en effet des caractéristiques mécaniques et physiques avantageuses par rapport aux barres d'armature traditionnelles en acier. En plus d'atteindre un rapport résistance/poids environ trente fois supérieur à celui de l'acier, les PRF sont résistants à la corrosion et contribuent ainsi à améliorer la durabilité des constructions en béton armé. Toutefois, un inconvénient notable de ces matériaux concerne l'élaboration de barres d'armature courbes. En effet, le procédé de fabrication par pultrusion confère aux barres en PRF des propriétés mécaniques unidirectionnelles. Par conséquent, la résistance dans la partie courbe d'une barre en PRF est inférieure à la résistance dans la direction longitudinale. Il est donc primordial d'évaluer les propriétés mécaniques des barres courbes en PRF à l'aide de méthodes d'essais fiables, d'autant plus que ces matériaux sont de plus en plus utilisés en tant qu'armatures dans des éléments structuraux en béton. Bien qu'il existe des méthodes d'essais standards, peu d'études ont été menées pour étayer la fiabilité de ces essais et les dispositifs expérimentaux restent peu pratiques à mettre en place.

L'objectif principal de ce projet de recherche est donc de développer une nouvelle méthode d'essai pour mesurer la résistance en traction de la partie courbée des barres d'armature courbes en PRF. Cette méthode d'essai devra être pratique à mettre en œuvre et devra fournir des résultats précis et fiables. Le nouveau protocole de caractérisation mécanique des barres d'armature courbes en PRF pourra ainsi être utilisé par le Ministère des Transports du Québec pour contrôler la qualité des produits utilisés dans ses ouvrages et infrastructures.

Un programme expérimental a donc été mis en œuvre afin de développer et valider la nouvelle méthode d'essai des barres d'armature courbes en PRF. Dans un premier temps, des essais physiques ont permis de s'assurer de la conformité des matériaux et de comparer les propriétés physiques dans la partie courbe des barres avec celles dans la partie rectiligne. Des essais mécaniques ont ensuite été conduits pour déterminer les paramètres expérimentaux de la nouvelle méthode d'essai. De nombreux spécimens ont été testés en étudiant l'influence de différents paramètres. Ces essais ont permis de déterminer la configuration optimale des

spécimens de test et valider le dispositif expérimental. Enfin, une étude numérique a été réalisée afin de comparer les résultats expérimentaux avec ceux obtenus à l'aide d'une modélisation par éléments finis. Le modèle numérique permet d'étudier la répartition des contraintes dans un spécimen de test et peut donc être utilisé pour valider les paramètres de la nouvelle méthode d'essai.

Le premier chapitre de ce rapport présente le contexte du projet de recherche. Il décrit d'abord le cadre du groupe de recherche au sein duquel s'inscrit le projet, puis présente la problématique des barres d'armature courbes en PRFV. La mise en contexte conduit à la définition des objectifs du projet et organise la démarche qui a été suivie pour atteindre ces objectifs. Le second chapitre présente l'état de l'art. Il décrit les méthodes d'essais standards existantes et présente des études antérieures sur lesquelles s'appuient les travaux de recherche. Les trois chapitres suivants décrivent les trois étapes de réalisation du projet, à savoir l'étude des propriétés physiques des matériaux, puis les essais mécaniques qui ont conduit au développement de la nouvelle méthode d'essai, et enfin une étude numérique avec la modélisation par éléments finis. Enfin, la conclusion présente les résultats du projet et propose des recommandations pour des futurs travaux.

# CHAPITRE 2      CONTEXTE

## 2.1 Groupe de recherche

À la demande du MTMDET, le projet qui fait l'objet de cet essai a été mené à l'Université de Sherbrooke, au sein du groupe de recherche supervisé par le professeur Brahim Benmokrane, ing., Ph.D. Ce groupe de recherche est composé d'une vingtaine d'étudiants gradués, qui sont en maîtrise ou en doctorat, ainsi que de plusieurs stagiaires postdoctoraux et assistants de recherche. Par ailleurs, les essais expérimentaux ont été réalisés avec l'aide de MM. Jérôme Lacroix et Steven MacEachern, techniciens en génie mécanique, ainsi que des étudiants stagiaires.

Le groupe de recherche du professeur Benmokrane est affilié au Centre de Recherche de l'Université de Sherbrooke sur les Matériaux Composites (CRUSMAC) ainsi qu'au Centre de Recherche pour les Infrastructures en Béton (CRIB). Les projets du groupe de recherche sont axés sur les thématiques de la chaire de recherche industrielle du CRSNG sur les matériaux composites novateurs en polymères renforcés de fibres (PRF) pour les infrastructures ainsi que de la Chaire de Recherche du Canada sur les matériaux composites utilisés pour les structures de génie civil (CRC de niveau 1). Les principaux objectifs de la chaire industrielle du CRSNG sont les suivants :

- L'amélioration, le développement et l'évaluation des renforcements de PRF existants et nouvellement développés ;
- L'évaluation de la durabilité, du cycle de vie et l'analyse des coûts ;
- La réalisation d'essais à grande échelle en laboratoire et le développement de modèles analytiques pour des structures en béton renforcé de PRF ;
- La mise en œuvre sur le terrain et le monitoring de l'état des structures à l'aide de capteurs à fibre optique ;
- Le transfert de technologie aux ingénieurs concepteurs, aux utilisateurs et à l'industrie de la construction, par l'organisation de conférences, de séminaires, d'ateliers de travail et de cours intensifs, ainsi que la formation de personnel hautement qualifié.

## 2.2 Barres d'armature courbes en PRFV

### 2.2.1 Utilisation des PRF dans les structures en béton

Les barres d'armature en polymères renforcés de fibres (PRF) sont de plus en plus utilisées dans les ouvrages et infrastructures en béton armé. L'intérêt de ces matériaux réside notamment dans leur rapport résistance/poids particulièrement avantageux. En effet, les barres d'armature en PRF offrent une résistance à la traction environ six fois plus élevée que celle de l'acier, pour un poids cinq fois inférieur. Par ailleurs, la raison principale pour laquelle les barres d'armature en PRF constituent une alternative intéressante aux armatures conventionnelles en acier est que les PRF sont des matériaux durables et notamment résistants à la corrosion, ce qui est particulièrement avantageux quand on sait que la corrosion des armatures en acier est à l'origine de nombreuses dégradations d'ouvrages. En outre, la neutralité électromagnétique des PRF est intéressante pour certaines utilisations notamment pour les dalles d'hôpital, car les barres d'armature en PRF ne créent pas d'interférence avec les appareils de radiologie.

### 2.2.2 Composition des matériaux en PRF

Les matériaux composites en PRF sont des matériaux structuraux constitués de fibres (renforts) et de résine polymère (matrice). Les fibres et la matrice travaillent en synergie par effet composite : les performances mécaniques et physiques des matériaux combinés sont supérieures à celles des matériaux utilisés séparément. Les fibres assurent la résistance mécanique du matériau tandis que la résine assure la résistance physique et chimique. L'orientation des fibres dans le PRF est déterminante : les fibres doivent être rectilignes et orientées dans la direction de chargement afin d'optimiser la résistance du matériau. Les fibres utilisées en génie civil sont principalement les fibres de verre (PRFV) et de carbone (PRFC), ainsi que les fibres d'aramide (PRFA) qui sont moins répandues, et les fibres de basalte (PRFB) qui sont en cours de développement. Les résines sont essentiellement des polymères thermodurcissables vinyle-ester, polyester ou époxydes. Les PRF comprennent également d'autres constituants comme des fillers et des additifs.

### 2.2.3 Types de barres d'armature en PRFV

Les barres en PRFV sont le type d'armature en PRF le plus utilisé, en raison de leur coût plus attractif. Au Québec et plus largement au Canada, trois formes d'armatures en PRFV sont utilisées : les barres régulières droites, les barres courbes et les barres droites avec têtes d'ancrage. La Figure 2.1 présente les différentes formes d'armatures en PRFV (ComBAR by

Fiberline). Les barres d'armature droites sont principalement utilisées pour le renforcement des éléments structuraux en béton soumis à des contraintes de tension, tandis que les barres courbes sont utilisées pour le renforcement en cisaillement, par exemple pour le renforcement transversal de poutres, de corniches et de bords de dalles. Les barres droites à têtes d'ancrage ont récemment été mises sur le marché. Elles sont utilisées comme armature dans les glissières de sécurité et comme ancrage d'extrémité ou pour le renforcement en cisaillement des poutres et des dalles. L'étude qui fait l'objet du présent essai s'intéresse principalement à l'étude des barres en PRFV courbes.

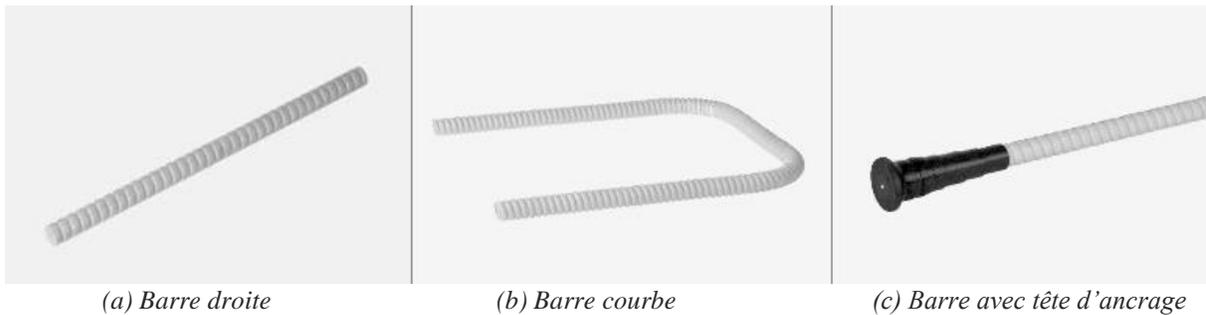


Figure 2.1 – Types de barres d'armature en PRFV

#### 2.2.4 Procédés de fabrication des barres d'armatures en PRFV

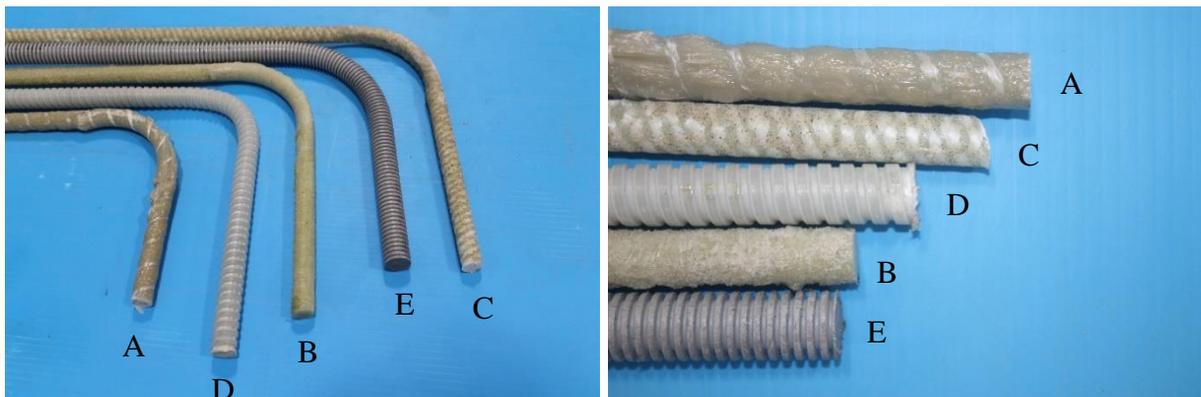
La plupart des barres d'armature en PRFV sont fabriquées par pultrusion. Lors de ce procédé, les fibres de verre sont imprégnées de résine vinylester, puis tirées à travers une filière chauffée qui donne à la barre sa forme finale par polymérisation de la résine thermodurcissable. Ce procédé de fabrication confère aux barres en PRFV des caractéristiques mécaniques anisotropes à cause de l'orientation unidirectionnelle des fibres. Par conséquent, la résistance transversale des barres est considérablement plus faible par rapport à la résistance longitudinale dans la direction des fibres. La résistance longitudinale, qui est principalement assurée par les fibres, est en effet de l'ordre de 800 à 1200 MPa, tandis que la résistance transversale est de l'ordre de 150 à 250 MPa, car elle est essentiellement attribuable à la résine qui assure la liaison entre les fibres.

Dans le cas des barres en PRFV courbes, différents procédés sont utilisés pour élaborer la courbure des barres. En effet, contrairement aux barres d'armature en acier qui peuvent être pliées sur le terrain, les barres en PRFV ne peuvent plus être pliées une fois la résine thermodurcissable polymérisée. Les barres en PRFV qui ont été utilisées dans le cadre de ce projet ont été fournies par différents manufacturiers, à savoir les barres V-ROD de Pultrall Inc.,

Aslan™ 100 de Hugues Brothers Inc., TUF-BAR de BP-Composites, MST-BAR® de B&B FRP Manufacturing Inc. et ComBAR de Fiberline Composites A/S. Ces barres présentent des caractéristiques mécaniques, physiques et géométriques différentes. Par la suite, pour les besoins de ce projet de recherche, ces différents types de barres seront désignés par A, B, C, D et E, indépendamment de l'ordre évoqué précédemment.

Les barres de types A, B et C sont pliées avant la polymérisation de la résine. Un produit de remplissage est appliqué à l'intérieur de la courbure pour limiter l'adhérence entre la barre et le béton et ainsi réduire la concentration de contraintes dans la partie pliée (Vint, 2012). Les barres de types D et E sont quant à elles fabriquées en insérant les fibres de verres imbibées de résine vinylester dans un tube en polypropylène plié selon la forme désirée. Les barres ainsi obtenues sont ensuite placées dans un four pour réaliser la polymérisation. Ce procédé est supposé assurer une teneur en fibres élevée et un alignement quasi-parallèle des fibres dans la partie courbe (ComBAR® by Fiberline, Technical Information).

Afin d'assurer la liaison entre l'armature en PRFV et le béton, différents revêtements de surface sont appliqués selon le manufacturier. Ainsi, la surface des barres de type B est incrustée de sable ; les barres de type A sont recouvertes d'un enroulement hélicoïdal de fibres et incrustées de sable ; et les barres de type C sont revêtues d'un tressage de fibres et incrustées de sable. Pour les barres de type D et E, l'adhérence avec le béton est assurée par la surface crénelée des tubes en polypropylène. La Figure 2.2 présente les différents types de barres en PRFV qui ont été utilisées dans le cadre de la présente étude :



(a) Détail sur les parties courbes

(b) Détail sur les revêtements de surface

Figure 2.2 - Types de barres en PRFV courbes utilisées dans le cadre de cette étude

## 2.3 Problématique

Depuis le début des années 2000, une cinquantaine de ponts du Ministère des Transports du Québec (MTQ) ont été conçus et construits avec des barres en PRFV. Ces matériaux ont été utilisés dans des éléments structuraux dont dépend la sécurité des usagers, comme les dalles et les glissières. Il est donc primordial de s'assurer de la qualité et des propriétés des matériaux à l'aide de méthodes d'essais convenables. À l'heure actuelle, les normes canadiennes (CSA S806, CSA S807) et internationales (par exemple ACI 440.3R et ASTM) qui traitent des PRF en tant que matériaux structuraux proposent plusieurs types de tests afin de caractériser les propriétés physiques et mécaniques des barres d'armature en PRFV et d'en vérifier la durabilité. Néanmoins, très peu d'études ont été menées pour vérifier la fiabilité de certains de ces tests pour les barres courbes. De plus, il n'existe pas présentement de méthode d'essais standardisée pour déterminer la résistance en traction des barres courbes. Il est donc nécessaire de développer de nouvelles procédures et protocoles d'essais, d'où l'objet de ce projet de recherche.

Par ailleurs, il est essentiel de s'intéresser aux méthodes d'essai des barres courbes en PRFV, car la résistance dans la partie courbe est l'inconvénient majeur de ces matériaux. En effet, la résistance dans la partie courbe des barres en PRFV est plus faible que la résistance dans la direction des fibres (Ahmed et al., 2010; Ishihara et al., 1997). Cela est notamment dû au fait que dans la partie courbe, la barre d'armature est sollicitée latéralement par le contact avec le béton, en plus des contraintes longitudinales dues à la traction. La Figure 2.3 illustre les contraintes qui s'exercent sur la barre dans la partie courbe (Morphy, 1999). Or, comme il a été expliqué plus haut (cf. 2.2.4) les PRF sont des matériaux unidirectionnels qui résistent moins bien aux contraintes transversales comparativement aux contraintes longitudinales. Par conséquent, la concentration de contrainte et les contraintes latérales qui s'exercent dans la partie courbe contribuent à affaiblir la résistance de la barre dans cette zone. D'autre part, les fibres situées du côté intérieur de la courbure sont ondulées et ne sont pas tendues contrairement aux fibres situées du côté extérieur de la courbure. Les fibres intérieures non tendues ne contribuent donc pas à la résistance à la traction, ce qui tend également à diminuer la résistance dans la partie courbe de la barre en PRFV. La Figure 2.4 illustre l'orientation des fibres dans la partie courbe d'une barre en PRFV (Ahmed et al., 2010).

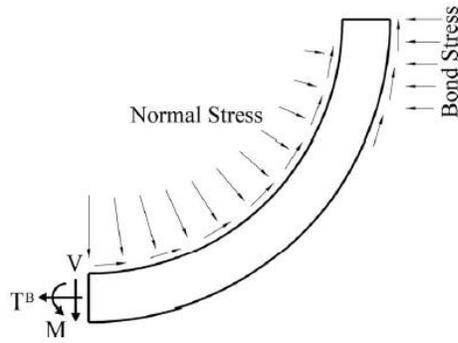
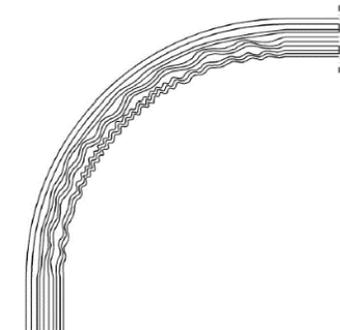


Figure 2.3 - Contraintes dans la partie courbe de l'armature



(a) Disposition des fibres après avoir retiré la résine



(b) Orientation des fibres

Figure 2.4 - Orientation des fibres dans la partie courbe d'une barre en PRFV

## 2.4 Objectifs

L'objectif principal de ce projet de recherche est de développer un nouveau protocole de caractérisation mécanique pour les barres d'armature courbes en PRFV. Le projet conduira donc au développement d'une méthode d'essai fiable et pratique à mettre en place, qui permettra au MTMDET d'élaborer des tests internes de contrôle de la qualité des produits utilisés dans ses ouvrages et infrastructures.

De manière plus spécifique, les objectifs du projet sont les suivants :

- Déterminer et valider des paramètres optimaux pour la réalisation d'essais de traction de barres courbes en PRFV ;
- Étudier à l'aide de modélisations par éléments finis le comportement de barres courbes en PRFV noyées dans des blocs de béton et soumises à des efforts de traction. En considérant les caractéristiques réelles des spécimens d'essais, cette étude numérique permettra notamment d'examiner la distribution des contraintes et des déformations ainsi que les zones les plus sollicitées.

## 2.5 Méthodologie

La démarche suivie pour développer et valider la nouvelle méthode d'essai des barres courbes en PRFV est la suivante :

- 1) Dans un premier temps, réaliser une veille technologique pour examiner les méthodes d'essais existantes et s'intéresser aux études antérieures qui ont été menées sur les barres courbes en PRFV. Cette revue de littérature fournit des exemples de tests et suggère des dispositifs expérimentaux qui pourraient être améliorés pour concevoir la nouvelle méthode d'essai ;
- 2) Ensuite, des essais sont effectués pour déterminer les propriétés physiques des matériaux testés. L'objectif de ces essais physiques est principalement de s'assurer de la conformité des matériaux, mais aussi de comparer les propriétés physiques dans la partie courbe des barres avec celles dans la partie rectiligne ;
- 3) Par la suite, des essais mécaniques sont conduits pour déterminer les paramètres expérimentaux de la nouvelle méthode d'essai. L'objectif de ces essais est d'examiner l'influence de différents paramètres sur la résistance des barres courbes en PRFV, afin de valider le protocole d'essai. De nombreux spécimens ont donc été testés avec des configurations variées, dans le but de déterminer la configuration de la méthode d'essai qui permet d'obtenir les résultats les plus pertinents. Les résultats obtenus avec la nouvelle méthode d'essai ont également été comparés avec ceux obtenus avec la méthode d'essai B.5 pour s'assurer que les deux méthodes fournissent des résultats équivalents ;
- 4) Enfin, une étude numérique est réalisée à l'aide de modélisations par éléments finis. L'objectif de cette étude est de comparer les résultats expérimentaux avec ceux obtenus numériquement. De plus, la modélisation par éléments finis permet d'examiner plus précisément la distribution des contraintes et les déformations ainsi que les zones les plus sollicitées dans un spécimen testé avec la nouvelle méthode d'essai.

# CHAPITRE 3 ÉTAT DE L'ART

## 3.1 Méthodes d'essai existantes

À l'heure actuelle, il existe principalement deux méthodes standard pour évaluer les caractéristiques mécaniques des barres d'armature courbes en PRF. La méthode d'essai B.5 permet de déterminer la résistance dans la partie courbe des barres, tandis que la méthode d'essai B.12 est utilisée pour évaluer l'effet du rayon de courbure sur la résistance. Ces deux méthodes sont définies dans le Guide de méthodes d'essais *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures* de l'ACI 440.3R-04 (Alkhrdaji et al., 2004). La méthode d'essai B.5 de l'ACI 440.3R-04 correspond à la méthode ASTM D7914/D7914M-14 *Standard Test Method for Strength of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bent Bars in Bend Locations*. L'annexe D (normative) « Méthode d'essais des barres pliées et des étriers en PRF » de la norme S806-12 (Groupe CSA, 2012) présente également une méthode d'essai similaire à la méthode B.5.

### 3.1.1 Méthode d'essai B.5

La méthode d'essai B.5 permet de déterminer la résistance de la partie courbe des étriers en PRF, afin d'établir un facteur de réduction entre la résistance de la partie courbe et la résistance spécifiée dans la direction des fibres. Cette méthode est donc utilisée pour déterminer les spécifications du matériau ou s'assurer de sa qualité. La Figure 3.1 présente un schéma du dispositif d'essai de la méthode d'essai B.5, tel que défini par l'annexe D de la norme CSA S806-12. Ce dispositif d'essai permet de tester des étriers en PRF dont les deux extrémités courbes sont coulées dans des blocs de béton. Les étriers sont sollicités en traction dans la direction de leurs parties rectilignes. L'effort de traction est exercé à l'aide d'un vérin hydraulique placé entre les deux blocs de béton. Le vérin est relié à une cellule dynamométrique afin de mesurer la charge appliquée. Le taux de chargement doit être tel que la rupture de l'étrier se produise une à dix minutes après le début du test. Des plaques en acier placées entre le vérin et les blocs de béton permettent de répartir uniformément l'effort. Le spécimen est placé sur des rouleaux en acier afin de limiter la friction entre les blocs de béton et le sol.

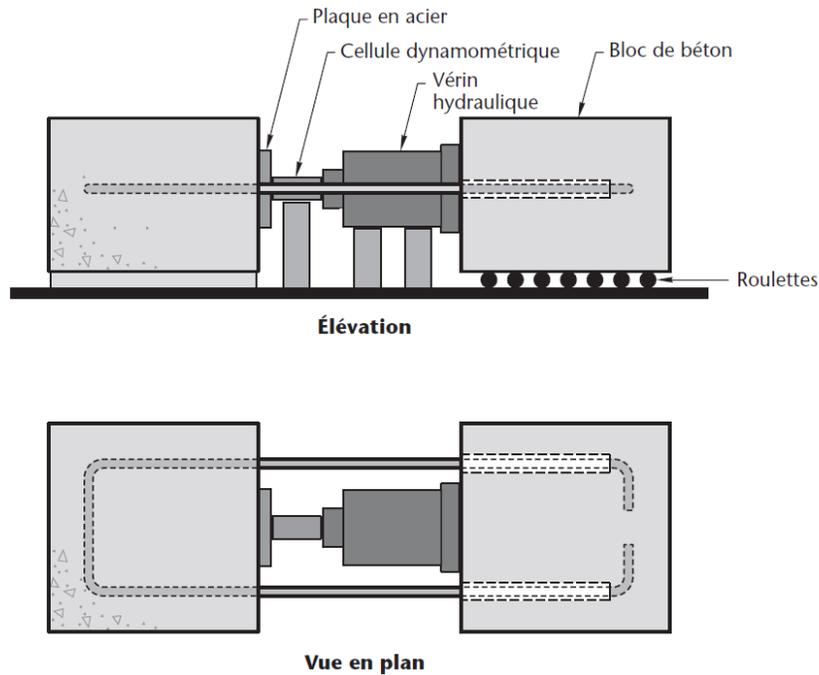


Figure 3.1 - Dispositif d'essai pour la méthode d'essai B.5

La portion rectiligne de l'étrier est désolidarisée du béton au moyen de tubes de déliaisonnement, afin de concentrer la sollicitation de traction sur la partie courbe de l'étrier. De cette manière, la rupture se produit dans la partie courbe et la résistance à la rupture qui est mesurée correspond à la résistance effective de la partie courbe et non à celle de la partie rectiligne. Les blocs de béton sont renforcés à l'aide d'étriers en acier pour éviter la rupture du béton durant l'essai de traction. Les normes ACI 440.3R-04, CSA S806-12 et ASTM D7914/D7914M-14 recommandent d'utiliser un béton de mélange standard, avec un granulat de diamètre maximal compris entre 20 et 25 mm, qui doit être préparé, dosé et malaxé selon les spécifications de la norme ASTM C192/192M, et qui présente un affaissement de  $100 \pm 20$  mm (selon les spécifications de la norme ASTM C143) et une résistance à la compression à 28 jours de  $30 \pm 3$  MPa (selon les spécifications de la norme ASTM C39/C39M). Selon l'annexe D de la norme CSA S806-12, les dimensions des blocs de béton varient en fonction des dimensions des étriers testés. La norme ASTM D7914/D7914M-14 recommande toutefois des dimensions supérieures à 300x500 mm, avec un enrobage minimum des étriers de 25 mm. La Figure 3.2 montre la configuration de l'éprouvette utilisée pour la méthode B.5, telle que définie par l'annexe D de la norme CSA S806-12.

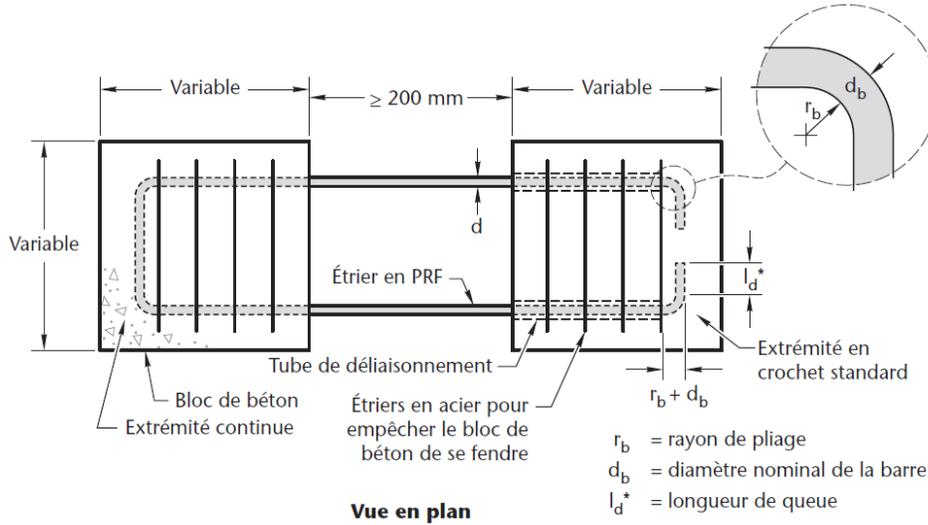


Figure 3.2 - Configuration de l'éprouvette pour la méthode d'essai B.5

La méthode d'essai B.5 permet d'étudier l'influence de différents paramètres : le diamètre des barres  $d_b$ , le rayon de courbure  $r_b$ , la longueur d'ancrage  $l_d^*$  et le type de matériau. Les différentes normes recommandent de tester un minimum de 5 échantillons pour les mêmes paramètres d'essai. L'essai d'un échantillon est valable si la rupture se produit dans la partie courbe de l'étrier en PRF. Si l'essai entraîne la rupture du bloc de béton avant celle de l'étrier, l'échantillon est rejeté. La résistance à la rupture de la partie courbe est calculée selon l'équation 3.1 :

$$f_b = \frac{F_u}{2A_b} \quad (3.1)$$

Avec :

- $f_b$  : la résistance à la rupture de la partie courbe (exprimée en MPa) ;
- $F_u$  : la charge à la rupture (en N) ;
- $A_b$  : la section nominale (en mm<sup>2</sup>) de l'extrémité de l'étrier.

Le facteur de réduction de la résistance est le rapport entre la résistance à la rupture de la partie courbe et celle de la partie rectiligne, comme l'indique l'équation 3.2 :

$$\chi = \frac{f_b}{f_{fu}} \quad (3.2)$$

Avec :

- $\chi$  : le facteur de réduction de la résistance ;
- $f_b$  : la résistance à la rupture de la partie courbe (en MPa) ;
- $f_{fu}$  : la résistance à la rupture de la partie rectiligne (en MPa).

### 3.1.2 Méthode d'essai B.12

La méthode d'essai B.12 de l'ACI 440.3R-04 est utilisée pour déterminer l'effet du rayon de courbure sur les propriétés en tension des barres d'armature en PRF. Le montage d'essai de la méthode B.12 comprend un dispositif de fixation en trois parties : un support de fixation fixe et un autre mobile, ainsi que des inserts interchangeables pour les angles qui s'adaptent aux différents rayons de courbure. Ce système de fixation permet de tester en traction une barre en PRF en forme de C. Des ancrages sont fixés aux extrémités de la barre pour la maintenir dans le dispositif de fixation. Une machine de test muni d'un vérin hydraulique assure l'écartement du dispositif de fixation pour solliciter la barre en tension. La vitesse de chargement dépend des spécifications du matériau testé. Il est recommandé d'appliquer une vitesse de chargement de 1.0 à 2.0 mm/min. Des capteurs de force et de déplacement permettent de mesurer la charge appliquée et les déformations dans la barre. La Figure 3.3 présente le dispositif d'essai de la méthode d'essai B.12, tel que défini par l'ACI 440.3R-04. La résistance à la traction réduite est calculée selon l'équation 3.3 :

$$S = \frac{F_u}{2A_b} \quad (3.3)$$

Avec :

$S$  : la résistance à la traction réduite (en MPa) ;

$F_u$  : la charge à la rupture (en N) ;

$A_b$  : la section nominale de la barre (en mm<sup>2</sup>).

Le module d'élasticité dans la partie courbe peut être calculé en mesurant les déformations à l'aide d'un capteur placé dans la partie courbe de la barre, puis en utilisant l'équation 3.4 :

$$E_b = \frac{\Delta F}{2A_b \Delta \varepsilon} \quad (3.4)$$

Avec :

$E_b$  : le module d'élasticité dans la partie courbe (en MPa) ;

$\Delta F$  : l'accroissement de la charge de traction (en N) ;

$A_b$  : la section nominale de la barre (en mm<sup>2</sup>) ;

$\Delta \varepsilon$  : la déformation dans la partie courbe de la barre.

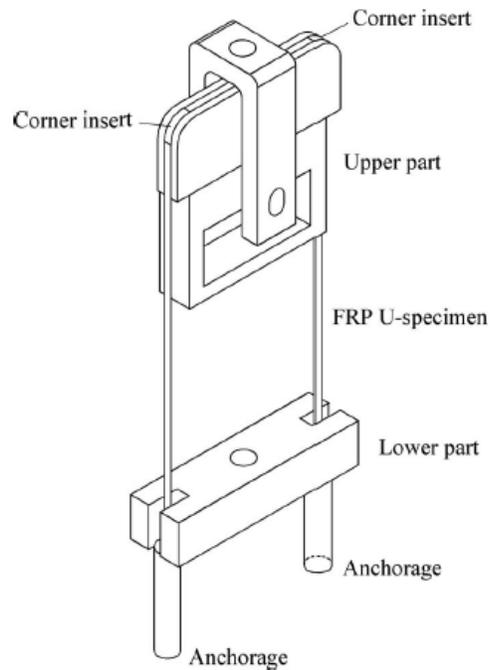


Figure 3.3 - Dispositif d'essai pour la méthode d'essai B.12

### 3.1.3 Comparaison des méthodes d'essai B.5 et B.12

Ahmed et al. ont comparé les méthodes d'essai B.5 et B.12 et ont évalué la pertinence de ces méthodes pour la détermination de la résistance dans la partie courbe des barres en PRF (Ahmed et al., 2010). L'objectif du programme expérimental de cette étude était de comparer les valeurs de résistance des barres courbes obtenues avec les méthodes B.5 et B.12, puis de comparer ces résultats avec la résistance des barres rectilignes, mesurée avec la méthode B.2 de l'ACI 440.3R-04. Différents échantillons de barres courbes et rectilignes ont donc été testés en étudiant l'influence de différents paramètres tels que le type de PRF (PRFC ou PRFV) et le diamètre des barres (barres #4, #5 et #6 de diamètres respectifs 13, 15 et 20 mm). Les résultats de cette étude ont montré qu'en utilisant la méthode d'essai B.5, la résistance dans la partie courbe équivalait à 50-70% de la résistance dans la partie rectiligne, alors qu'avec la méthode B.12 on obtenait 30-40%. Il a donc été conclu que la limite de 35% prescrite par ISIS Canada pour le facteur de réduction de la résistance était trop sécuritaire. De plus, la comparaison des deux méthodes d'essai a révélé que les résultats obtenus avec la méthode B.12 étaient inférieurs de 30 à 40% par rapport à ceux obtenus avec la méthode B.5. Par conséquent, chaque méthode devrait avoir un critère d'acceptation spécifique : 30% pour la méthode d'essai B.12 et 45% pour la méthode B.5. Lors des essais avec la méthode B.12, il a également été observé que les barres dont la

surface était indentée subissaient une concentration de contrainte à cause des indentations. Il en résulte que la méthode B.12 sous-estime la résistance dans la partie courbe pour les barres en PRF avec des indentations. La méthode B.5 permet toutefois de mieux répartir les contraintes le long de la partie courbe grâce au contact entre la barre et le béton. La méthode B.5 produit donc des résultats plus réalistes et permet également de prendre en compte différents paramètres comme la longueur d'ancrage et la longueur des extrémités. Finalement, il a été conclu que la méthode d'essai B.5 est plus appropriée pour rendre compte des performances des étriers en PRF, mais la méthode B.12 peut convenir pour des évaluations préliminaires.

## 3.2 Recherches sur la résistance des barres courbes en PRF

### 3.2.1 Étude précurseur avec des matériaux artisanaux

En 1993, Maruyama et al. sont parmi les premiers à s'intéresser à l'étude de la résistance des barres courbes en PRF (Maruyama et al., 1993). À l'époque, il n'existait pas encore de barres en PRF produites industriellement sur le marché. Le programme expérimental a donc été mené sur des barres fabriquées artisanalement : des torons en PRFC à 7 brins formés en vrillant 6 brins autour d'un brin central, des barres en PRFC confectionnées en enroulant des fibres en spirale et des barres en PRFA obtenues en tressant plusieurs nattes pré-imprégnées. Les barres ont été pliées manuellement en les plaçant sur des cadres métalliques puis en chauffant la résine époxy pour la polymériser. Les barres ont été pliées selon trois rayons de courbure internes différents : 5 mm, 15 mm et 25 mm. Afin d'être testées en traction, les barres ont été coulées dans des blocs de béton. Deux types de béton ont été utilisés : un béton haute résistance avec une résistance à la compression de 50 MPa, et un béton ultra haute performance de 100 MPa. La charge de traction a été appliquée à l'aide d'un vérin hydraulique. La répartition de la sollicitation a été examinée à l'aide de jauges de déformation. La Figure 3.4 illustre la configuration des spécimens et le dispositif expérimental qui a été utilisé. A l'issue des essais de traction sur les barres, différentes conclusions ont pu être tirées. Tout d'abord, toutes les barres en PRFC et PRFA se sont brisées dans la partie courbe, la rupture étant localisée au début de la portion courbe de la barre, du côté où la charge était appliquée. De plus, il a été observé que la résistance à la traction dans la partie courbe des barres en PRF a tendance à diminuer de manière exponentielle lorsque le rayon de courbure diminue. Toutefois, la résistance dans la partie courbe dépend également du type de fibre et de la méthode employée pour le pliage des

barres. En ce qui concerne l'influence de la résistance à la compression du béton, les résultats sont variables selon le type de barre. Néanmoins il semble que plus la résistance à la compression du béton est élevée, plus la résistance dans la partie courbe des barres augmente. Les différentes jauges de déformation placées sur les spécimens ont permis d'examiner la répartition des sollicitations le long des barres. Ainsi, il semble que la proportion de la charge de traction qui est transmise à l'ancrage à travers la portion courbe augmente avec le rayon de courbure, mais le degré d'augmentation varie selon le type de barre et la méthode de pliage. Finalement, même si les matériaux utilisés ne sont plus d'actualité, ce programme expérimental donne un premier aperçu des résultats que l'on obtient lors d'essais de traction de barres courbes en PRF. Surtout, cette étude primaire présente un dispositif expérimental intéressant qui n'utilise qu'un seul bloc de béton et qui permet de tester des barres de géométries variées, notamment en forme de L, contrairement aux méthodes d'essai B.5 et B.12 qui se limitent aux étriers en forme de C.

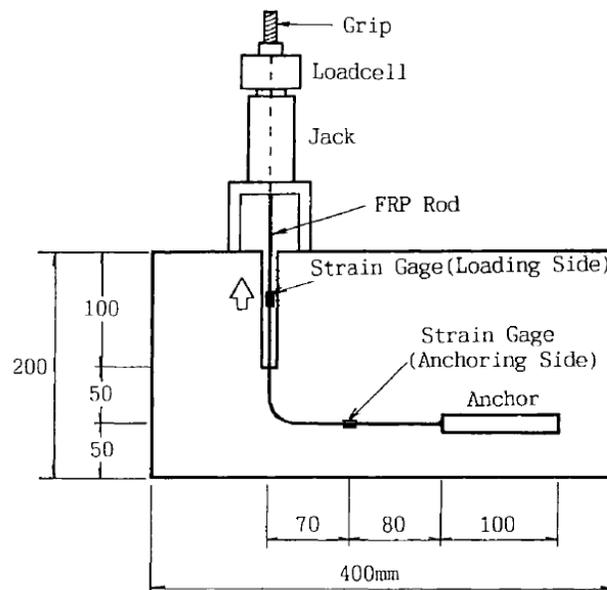


Figure 3.4 - Dispositif expérimental utilisé par Maruyama et al.

### 3.2.2 Étude de l'ancrage des barres d'armature courbes en PRFV

À partir de 1995, l'utilisation des PRF comme renforcement des structures en béton est de plus en plus développée, et des barres en PRFV produites industriellement par pultrusion sont désormais disponibles sur le marché. Cependant, les données expérimentales concernant les

propriétés de ces nouveaux matériaux restent rares. Ehsani et al. ont donc mené une étude pour déterminer les paramètres qui influencent l'adhérence au béton des étriers en PRFV (Ehsani et al., 1995). 36 étriers ont été testés sous charge statique pour examiner l'influence de différents paramètres, notamment la résistance à la compression du béton, le rayon de courbure, la longueur de l'extrémité, la longueur d'ancrage et le diamètre des barres. Le glissement entre l'armature et le béton a été mesuré à l'extrémité chargée de l'étrier pour différents niveaux de chargement. La force de traction a été appliquée jusqu'à fissuration du béton ou rupture de la barre en PRFV. La Figure 3.5 présente la configuration des spécimens qui ont été testés ainsi que le dispositif expérimental. Les résultats ont révélé qu'en augmentant la résistance à la compression du béton, le rayon de courbure ou la longueur d'ancrage, la contrainte ultime en tension ainsi que la rigidité initiale de la barre augmentait, et le glissement maximum à la rupture diminuait. À partir du moment où elle dépasse 12 fois le diamètre de la barre, la longueur de l'extrémité n'influence pas de manière significative la résistance de la barre. En s'appuyant sur une analyse de régression des résultats expérimentaux, il est recommandé que la longueur d'ancrage des étriers en PRFV soit équivalente à 16 fois le diamètre de la barre.

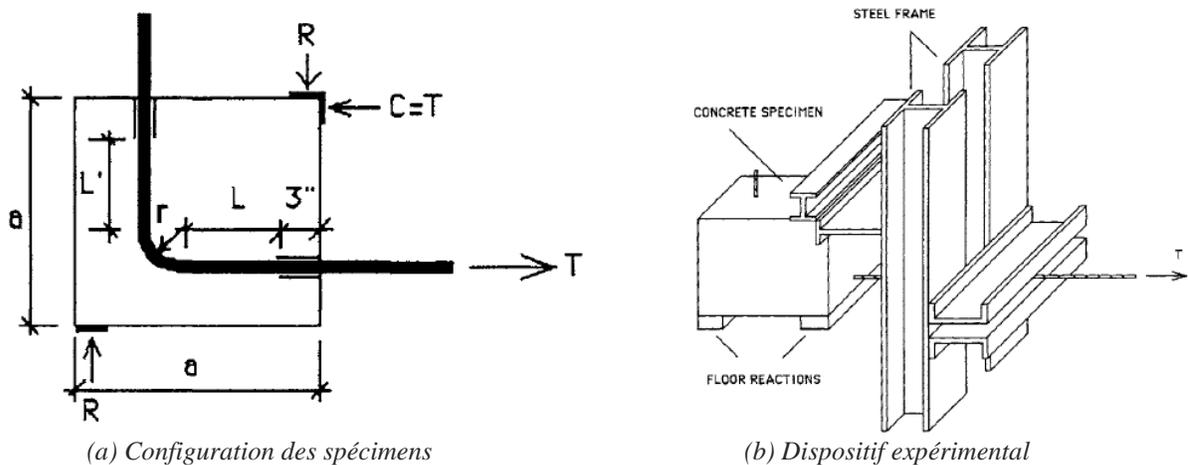


Figure 3.5 – Spécimen et dispositif expérimental utilisés par Ehsani et al.

### 3.2.3 Étude des paramètres de la méthode d'essai B.5

Dans le but de fournir des recommandations pour l'utilisation d'étriers en PRFC, Morphy et al. ont mené un programme expérimental sur vingt échantillons testés avec la méthode d'essai B.5 (Morphy, 1999). Seize de ces échantillons comprenaient des étriers en PRFC, tandis que les

quatre autres comprenaient des étriers en acier. Différents paramètres ont été mis à l'étude, notamment le diamètre des armatures, la longueur d'ancrage, l'épaisseur d'enrobage ainsi que le rayon de courbure des étriers. Le programme expérimental comprenait également 5 poutres en béton armé qui ont été testées en flexion quatre points. Trois de ces poutres étaient renforcées avec des étriers en PRFC, avec trois espacements des étriers différents, tandis que les deux autres étaient des poutres de contrôle, l'une étant renforcée avec des étriers en acier et l'autre n'étant pas renforcée en cisaillement. Les résultats du programme expérimental ont montré qu'une diminution de la longueur d'encastrement augmentait la possibilité de rupture dans la partie courbe des étriers, et par conséquent réduisait la résistance des étriers à 40% de la résistance dans la direction des fibres. Cela justifie le fait que des tubes de dé-liaisonement soient utilisés dans les spécimens de la méthode d'essai B.5, pour que la rupture des barres se produise dans la partie courbe. Par ailleurs, d'après les résultats des essais sur les poutres et en considérant la pratique courante pour l'espacement des étriers, il a été recommandé de limiter la valeur de la résistance des étriers en PRFC à 50% de la résistance garantie dans la direction des fibres.

Shehata et al. ont mené un programme expérimental pour étudier les performances structurelles des étriers en PRF utilisés pour le renforcement au cisaillement des structures en béton (Shehata et al., 2000). 42 échantillons ont été testés avec la méthode d'essai B.5, afin d'évaluer l'influence de la courbure sur la résistance des étriers en PRF. Différents paramètres ont été mis à l'étude, notamment la longueur d'ancrage, le type de matériau (PRFV, PRFC ou acier), le diamètre des barres, ainsi que la longueur de l'extrémité de l'étrier. Les résultats expérimentaux ont montré que la résistance dans la partie courbe pouvait être égale à seulement 35% de la résistance dans la direction des fibres. Concernant l'influence du rayon de courbure, il a été observé que plus le rayon de courbure des étriers était faible, plus la résistance dans la partie courbe diminuait, à cause de la concentration des contraintes dans la partie courbe. Par conséquent, il a été recommandé de respecter un rayon de courbure minimum de 50 mm ou 4 fois le diamètre de l'étrier, pour s'assurer que la résistance dans la partie courbe soit au moins égale à 50% de la résistance dans la direction des fibres. Concernant l'influence de la longueur d'ancrage, il a été observé qu'en augmentant la longueur de l'extrémité après la partie courbe, on augmentait la résistance de l'étrier. Il a ainsi été recommandé d'utiliser une extrémité de longueur minimum 70 mm ou six fois le diamètre de la barre, pour s'assurer que la résistance dans la partie courbe soit au moins égale à 50% de la résistance dans la direction des fibres.

### 3.2.4 Étude de la résistance de lamelles courbes en PRFV

Imjai et al. ont mené un programme expérimental pour étudier la performance de barres courbes en PRF (Imjai et al., 2007). Le matériau considéré dans la cadre de cette étude n'était pas des barres en PRFV fabriquées par pultrusion, mais des lamelles pré-imprégnées en fibres de verre et matrice en polypropylène. Il est toutefois pertinent de s'intéresser aux résultats de cette étude car la méthode d'essai utilisée pour tester la résistance à la traction des spécimens est similaire à celle qui a été développée dans le cadre du présent rapport. De plus, les lamelles pré-imprégnées présentaient des caractéristiques mécaniques comparables, bien que relativement inférieures, à celles des barres fabriquées par pultrusion. La Figure 3.6 illustre la configuration des spécimens testés par Imjai et al. Différents paramètres ont été mis à l'étude, notamment le rapport entre le rayon de courbure et la largeur des lamelles, le revêtement de surface, la longueur d'ancrage et la résistance du béton. 47 échantillons avec 19 configurations différentes ont été testés. Les résultats expérimentaux ont montré que, selon les configurations, la résistance dans la partie courbe des lamelles atteignait entre 25 et 85% de la résistance dans la direction des fibres. De plus, il a été observé que l'augmentation du rayon de courbure, de la longueur de l'extrémité, de la longueur d'ancrage ou de la résistance du béton entraînait une augmentation de la résistance des lamelles en PRFV. Finalement, même si cette étude s'intéresse à des lamelles en PRFV et non pas à des barres pultrudées, elle présente un dispositif expérimental intéressant et révèle les paramètres qui influencent la résistance dans la partie courbe des matériaux en PRFV.

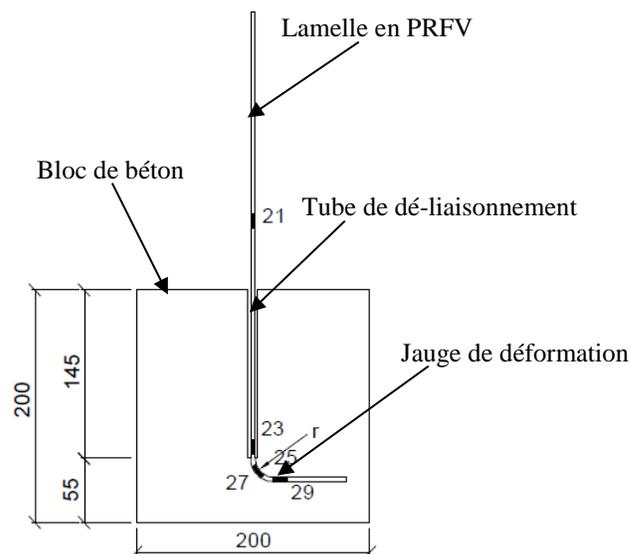


Figure 3.6 - Configuration des spécimens testés par Imjai et al.

### 3.3 Bilan de l'état de l'art

L'analyse des méthodes d'essais standards existantes révèle les limites de ces méthodes. En effet, la méthode d'essai B.12 ne donne pas des résultats satisfaisants et la méthode B.5 présente un inconvénient majeur, à savoir la complexité du dispositif expérimental. Premièrement, les spécimens de la méthode d'essai B.5 comportent deux blocs de béton, ce qui nécessite un coffrage spécifique et une quantité de béton non négligeable. Deuxièmement, la méthode d'essai B.5 requiert un support spécial car les spécimens doivent être placés sur des rouleaux en acier afin de limiter la friction entre les blocs de béton et le sol lors de l'essai. La méthode d'essai B.5 est donc assez difficile à mettre en place, en particulier lorsque l'on souhaite effectuer des essais directement sur un site de chantier. De plus, il est uniquement possible de tester des étriers en forme de C avec un rayon de courbure de  $90^\circ$ . La méthode d'essai B.5 est donc très limitée en ce qui concerne la géométrie des barres qu'il est possible de tester.

Par ailleurs, le fait que les spécimens soient constitués de deux étriers en PRF ajoute un facteur d'incertitude. En effet, la valeur de la résistance obtenue lors de l'essai correspond à la résistance combinée des étriers, qui peut différer de la résistance que l'on obtiendrait en testant chaque étrier séparément. De plus, la configuration du dispositif expérimental de la méthode d'essai B.5 provoque inévitablement une concentration des sollicitations sur un des deux étriers testés, ce qui diminue la résistance mesurée lors des tests. Cela est notamment dû au fait qu'il est impossible de parfaitement aligner le vérin hydraulique entre les deux blocs de béton, ni de parfaitement disposer les étriers dans le coffrage. Par conséquent, il y a toujours une erreur d'alignement qui provoque une concentration des sollicitations dans un des deux étriers. Par ailleurs, il est impossible que la résistance de chaque étrier soit parfaitement identique. Il y a donc toujours un étrier plus faible sur lequel les contraintes se concentrent.

Afin de pallier les défauts de la méthode B.5, la nouvelle méthode d'essai se doit donc d'être plus pratique à mettre en place et doit fournir des résultats qui rendent compte le plus fidèlement possible de la résistance dans la partie courbe des barres en PRF. L'examen des recherches antérieures sur la résistance des barres courbes en PRF fournit des exemples de tests et suggère des dispositifs expérimentaux qui pourraient être améliorés pour concevoir la nouvelle méthode d'essai. Cependant, les propriétés des matériaux ont beaucoup évolué depuis les premières recherches menées sur les barres courbes en PRF.

# CHAPITRE 4 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

## 4.1 Teneur en fibres

Selon les spécifications de la norme CSA S807-10 (Groupe CSA, 2012), la teneur en fibres des barres d'armature en PRFV doit être déterminée selon la méthode d'essai de la norme ASTM D2584-11 (*Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*) ou bien de la norme ASTM E1131-08 (*Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*). La méthode d'essai de la norme ASTM D2584-11 permet de déterminer la perte au feu des résines renforcées durcies. Or, pour un matériau composite constitué uniquement de fibres de verre comme renforcement d'une résine organique, la perte au feu peut être considérée comme la quantité de résine contenue dans l'échantillon. C'est pourquoi cette méthode d'essai peut être utilisée pour déterminer la teneur en fibres d'un PRFV. La méthode d'essai de la norme ASTM E1131-08 utilise quant à elle la thermogravimétrie pour déterminer les quantités de matière volatile et de matériau combustible ainsi que le contenu en cendre des matériaux. Cette méthode est donc utilisée pour analyser la composition d'un matériau et en particulier la teneur en fibres d'un PRFV. La norme CSA S807-10 spécifie une teneur en fibres volumique minimale de 55% lorsque la norme ASTM E1131 est utilisée, et une teneur en fibres massique minimale de 70% pour la norme ASTM D2584.

Les essais de détermination de la teneur en fibres ont été menés sur des échantillons provenant de barres de types A, B et C. Les échantillons ont été prélevés dans la partie courbe des barres ainsi que dans la partie rectiligne, afin de comparer la teneur en fibres dans chacune des zones. Trois échantillons ont été testés pour chaque type de barre (A, B et C) et chaque zone (partie rectiligne ou partie courbe de la barre), soit un total de 18 échantillons. Les résultats des essais de détermination de la teneur en fibres pour ces échantillons sont présentés dans le Tableau 4.1. Il en ressort que la différence de teneur en fibres entre les parties rectiligne et courbe reste minime, car l'écart relatif est inférieur à 5%. Cela est valable pour chaque type de barre qui a été testé. La teneur en fibres est légèrement supérieure dans la partie courbe car les fibres y sont ondulées et occupent donc plus de volume par rapport à la résine. Pour l'ensemble des échantillons testés, les valeurs de teneur en fibres sont supérieures à 70% et respectent donc les spécifications de la norme CSA S807-10.

Tableau 4.1 - Teneur en fibres des barres de type A, B et C (ASTM D2584)

Type de barre	A		B		C	
Zone	rectiligne	courbe	rectiligne	courbe	rectiligne	courbe
Moyenne	71.4%	74.6%	80.6%	82.1%	84.4%	85.4%
Écart Type	0.5%	1.8%	0.4%	0.7%	0.4%	0.3%
Coeff. Var.	0.7%	2.4%	0.5%	0.9%	0.5%	0.4%

Des échantillons provenant de la partie rectiligne de barres de type E ont également été testés, notamment afin de comparer la teneur en fibres avec et sans le tube de revêtement extérieur en plastique. Les résultats des essais de détermination de la teneur en fibres pour ces échantillons sont présentés dans le Tableau 4.2. Logiquement, la teneur en fibres augmente (d'environ 20%) lorsqu'on retire le tube de revêtement en plastique. Dans tous les cas, les valeurs de teneur en fibres sont supérieures à 70% et respectent donc les spécifications de la norme CSA S807-10.

Tableau 4.2 - Teneur en fibres des barres de type E (ASTM D2584)

Type de barre	E	
Tube de revêtement	avec	sans
Moyenne	72.1%	87.0%
Écart Type	0.5%	0.8%
Coeff. Var.	0.7%	1.0%

## 4.2 Coefficient d'expansion thermique

Selon les spécifications de la norme CSA S807-10, le coefficient d'expansion thermique transversal des barres en PRFV doit être déterminé selon la méthode d'essai de la norme ASTM E831-14 (*Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis*) ou bien de la norme ASTM D696-16 (*Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between -30°C and 30°C with a Vitreous Silica Dilatometer*). En l'occurrence, les essais qui ont été menés dans le cadre du présent projet ont été conduits selon la méthode de la norme ASTM E831-14. Cette méthode d'essai permet de déterminer le coefficient d'expansion thermique linéaire de matériaux solides en utilisant des techniques d'analyse thermomécaniques : les échantillons sont soumis à un taux de chauffage constant et la dilatation du matériau est mesurée en fonction de la température. La norme CSA S807-10 spécifie un coefficient d'expansion thermique transversal maximum de  $40 \times 10^{-6} \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ .

Les essais de détermination du coefficient d'expansion thermique ont été menés sur des échantillons provenant de la portion courbe de barres de type A, B, C et D. Trois échantillons ont été testés pour chaque type de barre, soit un total de 12 échantillons. Le Tableau 4.3 présente les résultats des essais de détermination du coefficient d'expansion thermique. Pour chaque type de barre, le coefficient d'expansion thermique transversal est inférieur à  $40 \times 10^{-6} \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , donc les spécifications de la norme CSA S807-10 sont bien respectées.

Tableau 4.3 - Coefficient d'expansion thermique transversal des barres de type A, B, C et D (ASTM E831)

$\alpha$ ( $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ )	Type A	Type B	Type C	Type D
Moyenne	32.4	20.8	18.2	20.4
Ecart type	1.9	2.7	1.6	1.4
Coeff. Var.	5.7%	13.0%	8.6%	6.9%

### 4.3 Température de transition vitreuse

Il est intéressant de déterminer la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) des PRFV car cela fournit des informations importantes concernant l'historique thermique du matériau et notamment l'avancement des réactions de polymérisation de la résine. La détermination de la température de transition vitreuse renseigne donc sur les conditions de fabrication et permet de mieux comprendre le comportement mécanique et physique du matériau. Selon les spécifications de la norme CSA S807-10, la température de transition vitreuse des PRFV doit être déterminée selon la méthode d'essai de la norme ASTM E1356-08 (*Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry*), ou ASTM D3418-15 (*Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry*) ou bien ASTM E1640-13 (*Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by Dynamic Mechanical Analysis*). En l'occurrence, les essais qui ont été menés dans le cadre du présent projet ont été conduits selon la méthode de la norme ASTM E1356-08. Cette méthode d'essai permet de déterminer la température de transition vitreuse par calorimétrie différentielle à balayage (en anglais *Differential Scanning Calorimetry* ou *DSC*). Ce procédé consiste à chauffer un matériau avec un taux contrôlé et à mesurer la différence de température entre le matériau testé et un matériau de référence. La courbe thermique obtenue par *DSC* montre les changements de capacité calorifique du matériau et permet notamment de mesurer la température de transition vitreuse, car celle-ci se manifeste par un seuil de changement de la capacité calorifique. La

norme CSA S807-10 spécifie une température de transition vitreuse minimale de 80°C pour les barres de classe de durabilité modérée, et 100°C pour les barres de classe de durabilité élevée.

Afin de comparer la température de transition vitreuse dans la partie rectiligne avec celle dans la partie courbe, des échantillons ont été prélevés dans chacune des zones. Les essais de détermination de la température de transition vitreuse ont été menés sur des échantillons provenant de chaque type de barre (A, B, C, D et E). 4 échantillons ont été testés pour chaque type de barre et chaque zone, soit un total de 40 échantillons. Les résultats des essais de détermination de la température de transition vitreuse sont présentés dans le Tableau 4.4(a) pour les échantillons prélevés dans la partie rectiligne et dans le Tableau 4.4(b) pour ceux prélevés dans la partie courbe. La Figure 4-1 présente un exemple d'une des courbes thermiques à partir desquelles les températures de transition vitreuse ont été déduites.

Tableau 4.4 - Température de transition vitreuse (ASTM E1356)

(a) Partie rectiligne des barres

Partie rectiligne		Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
$T_g$ (°C)	moyenne	117.5	122.0	112.5	115.5	87.3
	écart-type	4.51	4.97	3.79	7.90	23.97
	coeff. var.	3.8%	4.1%	3.4%	6.8%	27.4%

(b) Partie courbe des barres

Partie courbe		Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
$T_g$ (°C)	moyenne	118.5	119.8	114.8	112.3	88.8
	écart-type	4.04	3.77	4.57	3.86	23.67
	coeff. var.	3.4%	3.2%	4.0%	3.4%	26.7%

Les résultats des essais par *DSC* montrent que la différence de température de transition vitreuse entre les parties rectiligne et courbe des barres reste minime, car l'écart relatif entre les valeurs est inférieur à 3%. Les essais menés sur les échantillons prélevés dans des barres de type E ont donné des résultats avec une forte dispersion, comme le souligne le coefficient de variation supérieur à 25%. Cette forte dispersion des résultats est due à un défaut de qualité de fabrication des barres de type E. En effet, le lot de barres de type E qui a été testé comportait des barres dont le centre était dépourvu de résine. Néanmoins, hormis les barres de type E, les valeurs de température de transition vitreuse sont supérieures à 100°C et respectent donc les spécifications de la norme CSA S807-10 pour les barres de classe de durabilité élevée.

#### 4.4 Taux de cure

La méthode permettant de déterminer le taux de cure des barres en PRFV est décrite dans l'Annexe A de la norme CSA S807-10 (Groupe CSA, 2012). Les courbes thermiques obtenues par *DSC* (cf. 4.3) peuvent également être exploitées pour déterminer le taux de cure du PRFV. En effet, pour la plupart des échantillons testés, on observe un pic exothermique sur les courbes thermiques. Cette réaction exothermique correspond à la polymérisation résiduelle d'une partie de la résine qui n'avait pas été complètement polymérisée lors de la fabrication des barres. La Figure 4-1 présente un exemple de courbe thermique obtenue par *DSC*. La température de transition vitreuse (dont l'abscisse est marquée en pointillée sur la Figure 4-1) est obtenue par interpolation des tangentes au pic de flux thermique, conformément à la méthode de la norme ASTM E1356-08 (cf. 4.3). L'aire sur la courbe à l'endroit du pic exothermique (aire hachurée sur la Figure 4-1) correspond à l'enthalpie de polymérisation résiduelle de la résine au sein du composite, c'est-à-dire la quantité d'énergie qui est créée lors de la polymérisation de la résine qui n'avait pas réagi au sein du composite.

Pour déterminer l'enthalpie de polymérisation résiduelle de la résine pure, sans l'influence des fibres et du composite, il faut prendre en compte la teneur en fibres du PRFV (cf. 4.1). L'enthalpie de polymérisation résiduelle de la résine pure est donc calculée via l'équation 4.1 :

$$\Delta H_r = \frac{\Delta H}{100 - w_f} \quad (4.1)$$

Avec :

$\Delta H_r$  : l'enthalpie de polymérisation résiduelle de la résine pure (en J/g) ;

$\Delta H$  : l'enthalpie de polymérisation résiduelle de la résine au sein du composite (en J/g) ;

$w_f$  : la teneur en fibres du PRFV (en %).

Connaissant l'enthalpie de polymérisation totale de la résine vinylester ( $\Delta H_{total} = 250 \text{ J/g}$ ), on en déduit le taux de cure du PRFV en utilisant l'équation 4.2 :

$$C_{\%} = \frac{\Delta H_{total} - \Delta H_r}{\Delta H_{total}} \times 100 \quad (4.2)$$

Avec :

$C_{\%}$  : le taux de cure du PRFV (en %) ;

$\Delta H_{total}$  : l'enthalpie de polymérisation totale de la résine vinylester (en J/g) ;

$\Delta H_r$  : l'enthalpie de polymérisation résiduelle de la résine (en J/g).

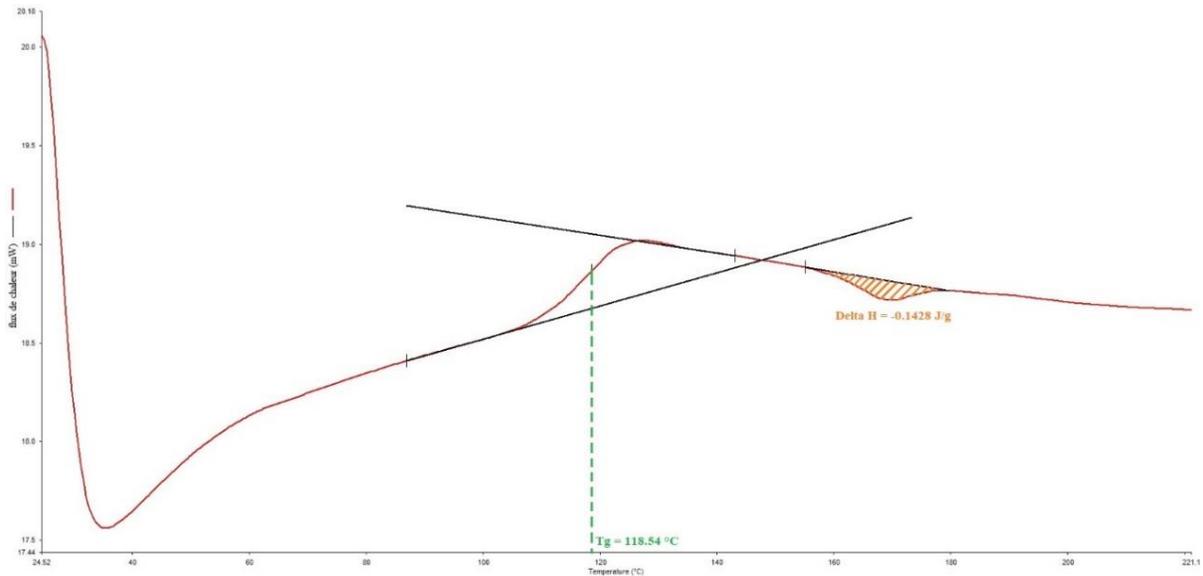


Figure 4-1 - Exemple de courbe thermique obtenue par DSC

La norme CSA S807-10 spécifie un taux de cure minimum de 93% pour les barres de classe de durabilité modérée, et 95% pour les barres de classe de durabilité élevée. Les courbes thermiques de 30 échantillons testés par DSC ont été exploitées pour déterminer le taux de cure des barres : trois échantillons pour chaque type de barre et chaque zone. Les résultats des essais de détermination du taux de cure sont présentés dans le Tableau 4.5(a) pour les échantillons prélevés dans la partie rectiligne et dans le Tableau 4.5(b) pour ceux prélevés dans la partie courbe des barres. Il en ressort que la différence de taux de cure entre les parties rectiligne et courbe des barres reste minime, car l'écart relatif entre les valeurs est inférieur à 1%. De plus, toutes les valeurs de taux de cure sont supérieures à 95% et respectent donc les spécifications de la norme CSA S807-10 pour les barres de classe de durabilité élevée.

Tableau 4.5 - Taux de cure (CSA S807-Annex A)

(a) Partie rectiligne des barres

Partie rectiligne		Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
<b>C<sub>%</sub></b>	moyenne	99.9%	99.8%	98.9%	97.2%	95.7%
	écart-type	0.1%	0.1%	0.8%	0.5%	0.1%
	coeff var	0.1%	0.1%	0.8%	0.5%	0.1%

(b) Partie courbe des barres

Partie courbe		Type A	Type B	Type C	Type D	Type E
<b>C<sub>%</sub></b>	moyenne	100.0%	98.9%	99.0%	97.4%	95.6%
	écart-type	0.0%	0.2%	0.6%	0.6%	1.1%
	coeff var	0.0%	0.2%	0.6%	0.6%	1.2%

## 4.5 Test de pénétration de colorant

Selon les spécifications de la norme CSA S807-10, la teneur en vide des barres en PRFV doit être déterminée selon la méthode d'essai de la norme ASTM D2734-16 (*Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics*) ou bien ASTM D5117-09 (*Standard Test Method for Dye Penetration of Solid Fiberglass Reinforced Pultruded Stock*). En l'occurrence, les essais qui ont été menés dans le cadre du présent projet ont été conduits selon la méthode de la norme ASTM D5117-09. Ce test de pénétration de colorant permet d'évaluer l'absorption longitudinale dans les barres en fibres de verre pultrudées. Des échantillons cylindriques de barres en PRFV sont en partie immergés dans un colorant et on observe sur la surface émergée l'action de la pénétration, qui se manifeste sous forme de points ou de tâches de couleur. L'action pénétrante le long du spécimen est due au phénomène de capillarité qui permet au colorant de pénétrer à travers les vides à l'intérieur du composite. Ces vides sont généralement remplis d'air et peuvent être causés par des vides continus, des fissures ou des fibres creuses qui peuvent nuire à l'intégrité structurelle du composite. Ce test de pénétration de colorant est donc utilisé pour évaluer l'intégrité des barres en PRFV et estimer la qualité du procédé de fabrication.

Afin de comparer la teneur en vides dans la partie rectiligne avec celle dans la partie courbe, des échantillons ont été prélevés dans chacune des zones. Les essais de détermination de la teneur en vide ont été menés sur des échantillons provenant de chaque type de barre. Trois échantillons ont été testés pour chaque type de barre et chaque zone, soit un total de 30 échantillons. La norme CSA S807-10 spécifie qu'il ne doit pas y avoir de vides ou de fissures longitudinales apparentes après quinze minutes de test de pénétration de colorant selon la méthode ASTM D5117. A l'issue des essais de pénétration de colorant, l'ensemble des échantillons testés étaient exempts de vides ou de fissures apparentes, à l'exception des échantillons provenant des barres de type E. En effet, comme cela a déjà été évoqué dans la partie 4.3, le lot de barres de type E qui a été testé comportait des barres dont le centre était dépourvu de résine. Par conséquent, le colorant pouvait facilement pénétrer le long des fibres au centre de l'échantillon. Sur la Figure 4-2, on distingue bien la différence entre le test de pénétration de colorant mené sur des échantillons provenant de barres de type B et celui mené sur des échantillons provenant de barres de type E.



(a) Barres de type B

(b) Barres de type E

Figure 4-2 - Tests de pénétration de colorant

## 4.6 Bilan des essais physiques

- La teneur en fibres est similaire dans les parties rectilignes et courbes des barres ;
- Toutes les barres qui ont été testées comportent une teneur en fibres massique supérieure à 70% et respectent donc les spécifications de la norme CSA S807-10 ;
- Pour l'ensemble des barres testées, le coefficient d'expansion thermique transversal est inférieur à  $40 \times 10^{-6} \mu m / (m. ^\circ C)$ , donc les spécifications de la norme CSA S807-10 sont bien respectées ;
- Pour chaque type de barre, les résultats des essais par *DSC* montrent que la température de transition vitreuse est similaire dans les parties rectilignes et courbes ;
- Hormis les barres de type E, chaque type de barre atteint une température de transition vitreuse supérieure à 100°C et respecte donc les spécifications de la norme CSA S807-10 pour les barres de classe de durabilité élevée. Les barres de type E atteignent néanmoins une température de transition vitreuse supérieure à 80°C et respectent donc les spécifications de la norme CSA S807-10 pour la classe de durabilité modérée ;
- Pour chaque type de barre, le taux de cure est similaire dans les parties rectilignes et courbes ;
- Chaque type de barre atteint un taux de cure supérieur à 95% et respecte donc les spécifications de la norme CSA S807-10 pour les barres de classe de durabilité élevée ;
- Les tests de pénétration de colorants révèlent un défaut de fabrication des barres de type E : le centre de ces barres est dépourvu de résine.

Finalement, les essais physiques démontrent que les propriétés physiques sont similaires dans les parties droites et courbes. Toutes les barres respectent les spécifications de la norme CSA S807-10, hormis les barres de type E qui présentent un défaut de fabrication.

# CHAPITRE 5 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

## 5.1 Présentation de la nouvelle méthode d'essai

### 5.1.1 Préparation des spécimens

#### Géométrie des spécimens

Afin de faciliter la mise en place des essais sur site et limiter la quantité de matériau utilisée, les spécimens qui ont été développés pour la nouvelle méthode d'essai comportent une seule barre en PRF en forme de L, qui est ancrée dans un bloc monolithique de béton. La Figure 5-1 illustre la configuration des spécimens. Dans le cadre de ce projet, seulement des barres en forme de L avec une courbure à 90° ont été testées. Néanmoins, la configuration des spécimens permet de tester également des barres de géométries différentes et avec des courbures variées. Les dimensions du bloc de béton ne sont pas spécifiées sur le schéma de la Figure 5-1 car c'est un des paramètres qui ont été définis à l'issue des essais menés dans le cadre du projet. Il en est de même pour la longueur d'ancrage de la barre (notée  $l_d^*$ ).

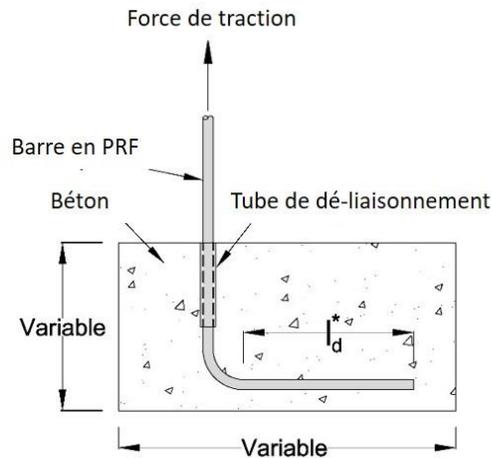


Figure 5-1 - Configuration d'un spécimen de test utilisé pour la nouvelle méthode d'essai

#### Tube de dé-liaisonnement

Un tube de dé-liaisonnement en plastique est installé autour de la barre avant de la couler dans le béton, afin d'empêcher l'adhérence entre le béton et la partie rectiligne de la barre située avant la courbure. De cette manière, la rupture de la barre lors de l'essai de traction est davantage susceptible de se produire dans la partie courbe, ce qui garantit que la résistance à la rupture qui est mesurée lors de l'essai soit bien celle de la partie courbe de la barre.

### Tube de préhension en acier

Avant de placer la barre dans le coffrage et de la couler dans le béton, il est nécessaire de fixer un tube en acier autour de l'extrémité de la barre qui va être sollicitée en traction durant l'essai. En effet, en raison des caractéristiques orthotropes des PRF, la préhension directe de la barre pourrait endommager le matériau. Ainsi, le tube de préhension en acier permet de mieux répartir la charge sur la barre et évite de l'endommager. Les tubes en acier sont fixés autour des barres en PRF en injectant un coulis expansif entre la barre et le tube. Les dimensions des tubes de préhension doivent être adaptées au diamètre des barres en PRF (Benmokrane et al, 2017). La Figure 5-2 montre une barre en PRF munie d'un tube de préhension en acier et d'un tube de dé-liaisonnement.

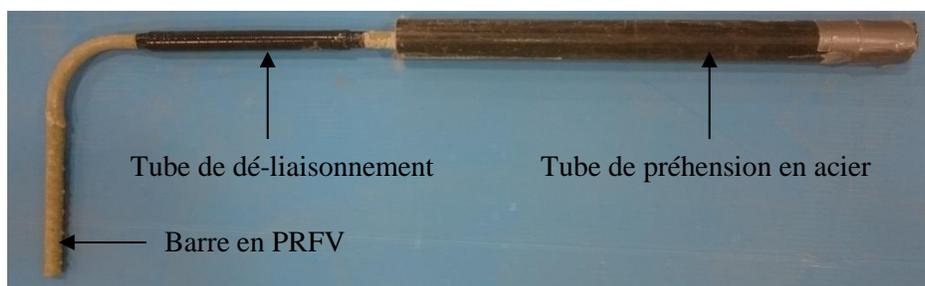


Figure 5-2 - Barre en PRFV munie d'un tube de préhension et d'un tube de dé-liaisonnement

### Béton

Le béton utilisé pour les spécimens de test est un béton de mélange standard, avec un granulat de diamètre maximal compris entre 20 et 25 mm, qui doit être préparé, dosé et malaxé selon les spécifications de la norme ASTM C192/192M, et qui présente un affaissement de  $100 \pm 20$  mm (selon les spécifications de la norme ASTM C143) et une résistance à la compression à 28 jours de  $35 \pm 3$  MPa (selon les spécifications de la norme ASTM C39/C39M). Les détails de la formule de béton utilisée avec ses ingrédients et dosages sont donnés dans l'Annexe B. Afin de réduire le délai entre la préparation des spécimens et la réalisation des essais, il est possible d'utiliser un béton à haute performance à prise rapide, qui atteint une résistance à la compression supérieure à 35 MPa en seulement 72 heures. Pour que l'essai de traction soit validé, la rupture doit se produire dans la partie courbe de la barre et le bloc de béton ne doit pas se briser avant la barre en PRF. Ainsi, dans le cas d'essais de barres avec un diamètre important ou une résistance élevée, les blocs de béton peuvent être renforcés avec des cages d'armatures en acier. Les Figure 5-3(a) et (b) montrent des coffrages qui ont été utilisés pour construire les spécimens. La Figure 5-3(c) montre la disposition des barres dans le coffrage avec un spécimen renforcé à l'aide d'une cage d'armatures en acier et un autre spécimen non renforcé.



(a) Coffrages avant la coulée du béton



(b) Coffrages après la coulée du béton



(c) Coffrages avec et sans cage d'armatures en acier

Figure 5-3 - Disposition des barres dans les coffrages

### Supports de manutention

Afin de faciliter la manutention des spécimens, il est nécessaire de placer des supports sur les blocs de béton. Dans un premier temps, des anses ont été réalisées en coulant des étriers en acier dans les blocs de béton. Par la suite, les étriers en acier ont été remplacés par des câbles en acier galvanisé, plus économiques et plus faciles à installer. La Figure 5-4 montre les supports qui ont été utilisés pour assurer la manutention des spécimens.

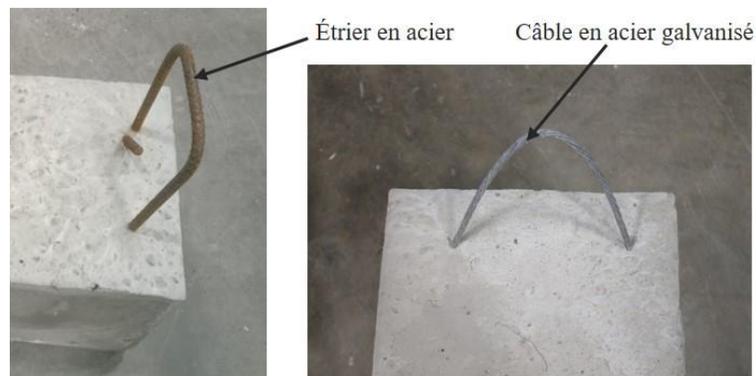


Figure 5-4 - Types d'anses utilisées pour la manutention des blocs de béton

### 5.1.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental de la nouvelle méthode d'essai est constitué d'un vérin hydraulique qui applique une charge de traction sur la barre en PRF, ainsi qu'une cellule de charge qui permet de mesurer la force appliquée. Des plaques d'appui en caoutchouc et en acier sont disposées entre le bloc de béton et le vérin afin de mieux répartir la charge sur la surface du bloc de béton. L'effort de traction du vérin doit s'exercer dans la direction de la barre, à la verticale. Il est donc important de s'assurer que la plaque d'appui soit bien positionnée de niveau avant de placer le vérin. Le vérin hydraulique à piston creux est placé autour de la barre en PRF, puis une plaque en acier est soudée autour du tube de préhension de la barre pour servir d'appui au vérin. Les spécimens de test ne doivent pas subir de chocs, de vibrations ou toute autre sollicitation indésirable avant et pendant l'essai. La charge de traction doit être appliquée de manière régulière et continue jusqu'à rupture du spécimen. La force de traction appliquée par le vérin est mesurée par la cellule de charge. Il est également possible de placer un capteur de déplacement sur la barre en PRF pour mesurer la déformation de la barre. La Figure 5-5 présente le dispositif expérimental de la nouvelle méthode d'essai :

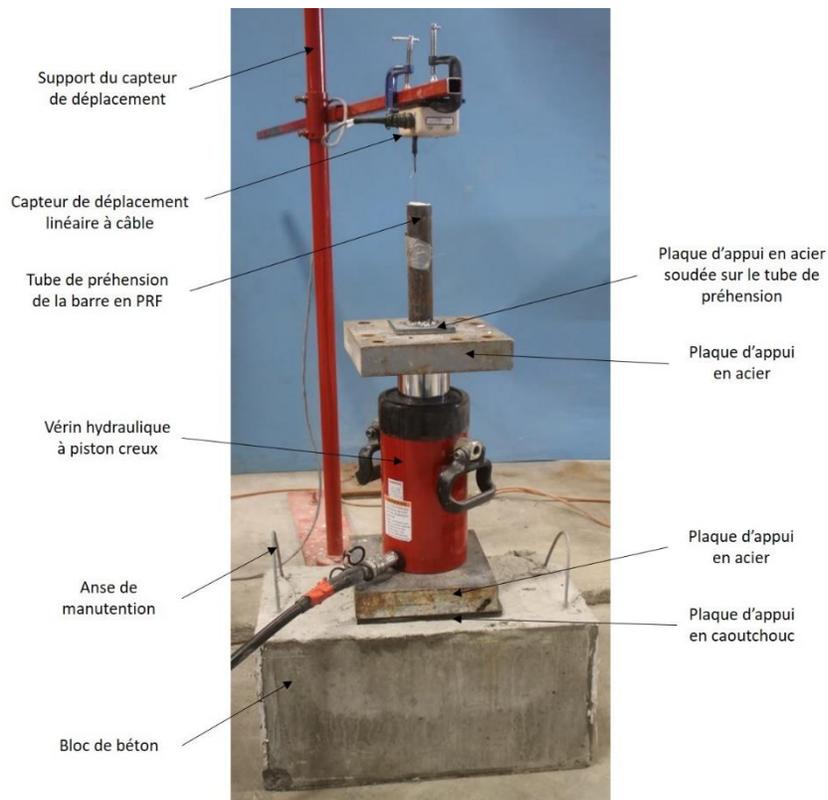


Figure 5-5 - Dispositif expérimental de la nouvelle méthode d'essai

### 5.1.3 Détermination de la résistance dans la partie courbe

L'essai de traction d'une barre courbe en PRF est validé si la rupture de la barre s'est produite dans la partie courbe. Si le bloc de béton s'est brisé sans que la barre ait rompu, l'essai n'est pas validé. Lorsque la rupture du spécimen est validée, il convient de relever le mode de rupture et d'enregistrer la force appliquée à la rupture. La résistance dans la partie courbe de la barre est calculée selon l'équation 5.1 :

$$f_b = \frac{F_u}{A} \quad (5.1)$$

Avec :

$f_b$  : la résistance dans la partie courbe de la barre (en MPa) ;

$F_u$  : la charge ultime à la rupture obtenue lors de l'essai (en N) ;

$A$  : l'aire de la section de la barre (en mm<sup>2</sup>).

L'aire de la section de la barre peut être considérée comme étant égale à l'aire effective de la section (déterminée selon la méthode de l'Annexe A de la norme CSA S806-12) ou bien égale à la section nominale correspondant à la désignation de la barre (d'après le Tableau 1 de la norme CSA S807-10).

## 5.2 Organisation des essais mécaniques

### 5.2.1 Paramètres étudiés

Dans le but de déterminer les paramètres optimaux pour la réalisation des essais de traction de barres courbes en PRFV, différentes variables ont été mises à l'étude :

#### 1) Type de barre en PRFV

Les barres testées proviennent de 5 manufacturiers différents, qui utilisent des procédés de fabrication distincts pour réaliser la courbure et le revêtement de surface des barres (cf. 2.2).

#### 2) Méthode d'essai utilisée

En plus des essais avec la nouvelle méthode, 20 spécimens ont été testés avec la méthode d'essai B.5 (4 spécimens pour chacun des 5 manufacturiers). L'objectif de ces essais est de fournir des valeurs de référence afin de comparer les résultats obtenus à l'aide de la nouvelle méthode d'essai avec ceux obtenus avec la méthode d'essai B.5.

#### 3) Diamètre des barres

Cinq diamètres différents sont étudiés, en testant des barres #3, #4, #5, #6 et #8 de diamètres respectifs 10mm, 13 mm, 15 mm, 20 mm et 25 mm. Pour les calculs de résistance des barres, l'aire des sections est considérée comme étant égale à l'aire nominale correspondant à la désignation des barres. D'après le Tableau 1 de la norme CSA S807-10, l'aire nominale des barres #3 vaut 71 mm<sup>2</sup>, celle des barres #4 vaut 129 mm<sup>2</sup>, celle des barres #5 vaut 199 mm<sup>2</sup>, celle des barres #6 vaut 284 mm<sup>2</sup> et celle des barres #8 vaut 510 mm<sup>2</sup>.

#### 4) Propriétés du béton

Dans un premier temps, les spécimens testés ont été conçus en utilisant un béton de mélange standard, avec une résistance à la compression à 28 jours d'environ 35 MPa. 6 spécimens ont également été testés avec un béton haute performance à prise rapide dont la résistance à la compression atteint 45 MPa après 72 heures. L'objectif est de déterminer si l'utilisation d'un béton à prise rapide permet d'obtenir des résultats similaires pour la résistance des barres. Si l'utilisation d'un béton à prise rapide est validée pour la nouvelle méthode d'essai, cela améliorera la procédure d'essai en diminuant considérablement le temps de prise requis avant de tester les spécimens.

#### 5) Dimensions du bloc de béton

Les dimensions du bloc de béton doivent être choisies de telle manière que la rupture se produit dans la barre de PRF et non pas éclatement et fissuration du bloc. La nouvelle méthode d'essai proposée pour déterminer la résistance en traction des barres d'armature PRFV courbes comprend un bloc de béton ayant comme dimensions 600x300x300 mm; ces dimensions sont suffisantes pour induire la rupture dans les barres de PRFV sans éclatement et fissuration du bloc. Aussi les résultats par éléments finis illustrés à la figure 6.13 montrent que les contraintes et déformations sont en grande partie concentrées autour de la courbure de barres de PRFV. Les dimensions du bloc mentionnées plus haut ont été utilisées pour toutes les barres et les grosseurs de barres considérées dans ce projet de recherche

#### 6) Renforcement du bloc de béton avec des étriers en acier

Pour certaines barres dont la résistance est plus élevée, l'essai de traction peut conduire à la rupture du bloc de béton avant la rupture de la barre. Afin de pallier ce problème qui pourrait nuire aux résultats des essais, certains spécimens ont été renforcés avec des étriers en acier.

#### 7) Taux de chargement

La plupart des essais de traction ont été conduits avec un taux de chargement de 250 MPa/min. Cependant, des spécimens ont également été testés avec des taux de chargement de 500, 125 et 62.5 MPa/min, pour étudier l'influence du taux de chargement sur le résultat des essais.

#### 8) Enrobage

Dans un premier temps, tous les spécimens ont été conçus avec un enrobage des barres en PRF dans le bloc de béton de 50 mm. Au vu des résultats des essais pour certains types de barres (cf. Figure 5-8), il est envisagé d'augmenter l'enrobage à 100 mm pour examiner si l'épaisseur d'enrobage a une influence sur les résultats des essais.

#### 9) Longueur d'ancrage

La longueur d'ancrage  $l_d^*$  correspond à la longueur de l'extrémité de la barre qui est située après la partie courbe. C'est un paramètre reconnu pour influencer la résistance des barres courbes en PRF (cf. 3.2.2, 3.2.3 et 3.2.4). Ainsi, différentes longueurs d'ancrage ont été testées en utilisant des barres avec 5 longueurs d'extrémité différentes, respectivement égales à 3, 6, 10, 12 et 15 fois le diamètre des barres.

#### 10) Exposition à un environnement agressif

Afin d'évaluer la durabilité du PRFV, des barres sont testées après avoir été plongées dans une solution alcaline pendant un mois. Cette solution alcaline, de pH environ 13, est constituée d'hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$ , d'hydroxyde de sodium  $NaOH$  et d'hydroxyde de potassium  $KOH$ .

### 5.2.2 Programme expérimental

Le Tableau A.0.1 de l'Annexe A dressé l'inventaire de l'ensemble des spécimens qui sont testés lors des différentes phases du programme expérimental. Dans un premier temps, 20 spécimens (4 spécimens pour chacun des 5 types de barres) ont été testés avec la méthode d'essai B.5 pour fournir des valeurs de référence. Par la suite, plusieurs phases d'essais ont été conduites avec la nouvelle méthode, chaque phase correspondant à l'étude d'un des paramètres cités au chapitre 5.2.1 :

- 1) La première phase comportait 25 spécimens : 5 barres #5 (diamètre 15 mm) pour chacun des 5 types de barres, avec une longueur d'ancrage égale à 12 fois le diamètre des barres ( $l_d^* = 12d$ ). Les blocs de béton de dimensions  $300 \times 300 \times 600$  mm ont été réalisés avec un béton de mélange standard, sans renforcement et avec un enrobage de 50 mm. Ces spécimens ont été testés avec un taux de chargement de 250 MPa/min.

- 2) La deuxième phase d'essais comportait 12 spécimens : 6 barres #6 (diamètre 20 mm) pour chacun des types de barres B et D, avec une longueur d'ancrage égale à 12 fois le diamètre des barres ( $l_a^* = 12d$ ). Pour chaque type de barre, la moitié des spécimens étaient renforcés avec des cages d'armatures en acier. Les blocs de béton de dimensions  $300 \times 300 \times 600$  mm ont été réalisés avec un béton de mélange standard et avec un enrobage des barres de 50 mm. Les spécimens ont été testés avec un taux de chargement de 250 MPa/min.
  - 3) La troisième phase d'essais comportait 16 spécimens : 8 barres #5 (diamètre 15 mm) pour chacun des types de barres D et B. 4 longueurs d'ancrages différentes ont été étudiées ( $l_a^* = 3d$  ;  $l_a^* = 6d$  ;  $l_a^* = 10d$  et  $l_a^* = 15d$ ), avec 2 spécimens testés pour chaque longueur d'ancrage et chaque type de barre. Les blocs de béton de dimensions  $300 \times 300 \times 600$  mm ont été réalisés avec un béton de mélange standard, sans renforcement et avec un enrobage de 50 mm. Ces spécimens ont été testés avec un taux de chargement de 250 MPa/min.
  - 4) La quatrième phase d'essai comportait 6 spécimens : 3 barres #5 et 3 barres #6 de type B, avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$ . Les blocs de béton de dimensions  $300 \times 300 \times 600$  mm ont été réalisés avec un béton haute performance à prise rapide, sans renforcement et avec un enrobage de 50 mm. Le béton atteignait une résistance à la compression de 43 MPa après 72 heures. Les spécimens ont été testés avec un taux de chargement de 250 MPa/min.
  - 5) La cinquième phase d'essai comportait 16 spécimens : 3 barres #4 de type B, 3 barres #4 de type B, 5 barres #3 de type C et 5 barres #8 de type C. Les barres ont été ancrées avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$  et un enrobage de 50 mm dans des blocs de béton de dimensions  $300 \times 300 \times 600$  mm réalisés avec un béton de mélange standard. Les spécimens ont été testés avec un taux de chargement de 250 MPa/min
  - 6) La sixième phase d'essai comportait 9 spécimens : 9 barres #5 de type B ancrées avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$  et un enrobage de 50 mm dans des blocs de béton de dimensions  $300 \times 300 \times 600$  mm réalisés avec un béton de mélange standard. Les spécimens ont été testés avec 3 taux de chargement différents : 62.5, 125 et 500 MPa/min. Trois spécimens ont été testés pour chacun des trois taux de chargement.
- Analyse des résultats

### 5.2.3 Validation de la fiabilité des résultats

Le Tableau 5.1 présente les résultats obtenus pour les essais avec la méthode B.5. Tous les étriers testés avec la méthode d'essai B.5 se sont brisés avec une rupture dans la partie courbe, sauf certains spécimens avec des barres de type D pour lesquels c'est le bloc de béton qui a cédé. Néanmoins, les essais selon la méthode B.5 ont révélé que les différents types de barres présentaient des résistances semblables. En effet, le coefficient de variation entre les différents types de barres est inférieur à 15%. Pour l'ensemble des types de barres, la charge à la rupture moyenne est de l'ordre de 250 kN avec la méthode d'essai B.5.

Tableau 5.1 - Résultats des essais avec la méthode B.5

Type de barre		A	B	C	D	E
Charge à la rupture (kN)	moyenne	210.6	306.1	251.3	253.1	235.5
	écart type	20.4	29.8	5.2	21.4	20.2
	coeff. var.	9.7%	9.7%	2.1%	8.4%	8.6%

Le Tableau 5.2 répertorie les résultats obtenus lors de la première phase d'essais avec la nouvelle méthode (barres #5,  $l_a^* = 12d$ ). Pour chaque type de barre, le coefficient de variation reste inférieur à 10%, avec 5 spécimens testés. Cette faible dispersion des résultats atteste la fiabilité de la nouvelle méthode d'essai. Pour l'ensemble des types de barres, la charge à la rupture moyenne est de l'ordre de 130 kN avec la nouvelle méthode d'essai.

Tableau 5.2 - Résultats de la première phase d'essais avec la nouvelle méthode

Type de barre		A	B	C	D	E
Charge à la rupture (kN)	moyenne	125.4	159.4	112.1	160.2	98.6
	écart type	10.6	14.6	9.2	6.1	10.2
	coeff. var.	8.5%	9.2%	8.2%	3.8%	10.4%

Le Tableau 5.3 présente les résultats obtenus lors de la deuxième phase d'essais. Pour ces essais menés avec des barres #6, le coefficient de variation reste inférieur à 10% pour chaque type de barre, que les blocs de béton soient renforcés ou non. Au vu de cette faible dispersion des résultats, la fiabilité de la nouvelle méthode est donc également confirmée pour l'essai de barres de diamètre plus important.

Tableau 5.3 - Résultats de la deuxième phase d'essais avec la nouvelle méthode

Type de barre		D		B	
Renforcement		avec	sans	avec	sans
Charge à la rupture (kN)	moyenne	192.5	193.8	180.0	181.7
	écart type	8.5	9.1	19.0	7.7
	coeff. var.	4.4%	4.7%	10.6%	4.3%

Le Tableau 5.4 comprend les résultats obtenus lors de la troisième phase d'essais. Pour chaque type de barre et chaque longueur d'ancrage testés, les coefficients de variation restent inférieurs à 10%, excepté pour les spécimens testés avec une longueur d'ancrage égale à six fois le diamètre de la barre. Ainsi, la nouvelle méthode d'essai reste fiable quelle que soit la longueur d'ancrage, mais les spécimens avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 6d$  fournissent des résultats avec une dispersion plus importante qui reste toutefois inférieure à 15%.

Tableau 5.4 - Résultats de la troisième phase d'essais avec la nouvelle méthode

Type de barre		D					B				
longueur d'ancrage $l_a^*$		3d	6d	10d	12d	15d	3d	6d	10d	12d	15d
Charge à la rupture (kN)	moyenne	108.7	134.4	146.0	160.2	147.5	143.0	146.3	163.4	159.4	142.6
	écart type	6.7	20.2	12.3	6.1	0.2	2.4	16.9	8.6	14.6	6.4
	coeff. var.	6.1%	15.1%	8.5%	3.8%	0.1%	1.7%	11.5%	5.3%	9.2%	4.5%

La Figure 5-6 représente les courbes force-déplacement mesurées pour trois barres #5 de type A, avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$ . La similarité des données mesurées pour ces trois barres confirme la fiabilité de la nouvelle méthode d'essai. L'allure des courbes force-déplacement est cohérente au vu du comportement linéaire élastique des barres en PRFV. Il est d'ailleurs possible de déterminer le module d'élasticité des barres en divisant le coefficient directeur des courbes par l'aire de la section des barres. En l'occurrence, le module d'élasticité des barres de type A vaut environ 57 GPa.

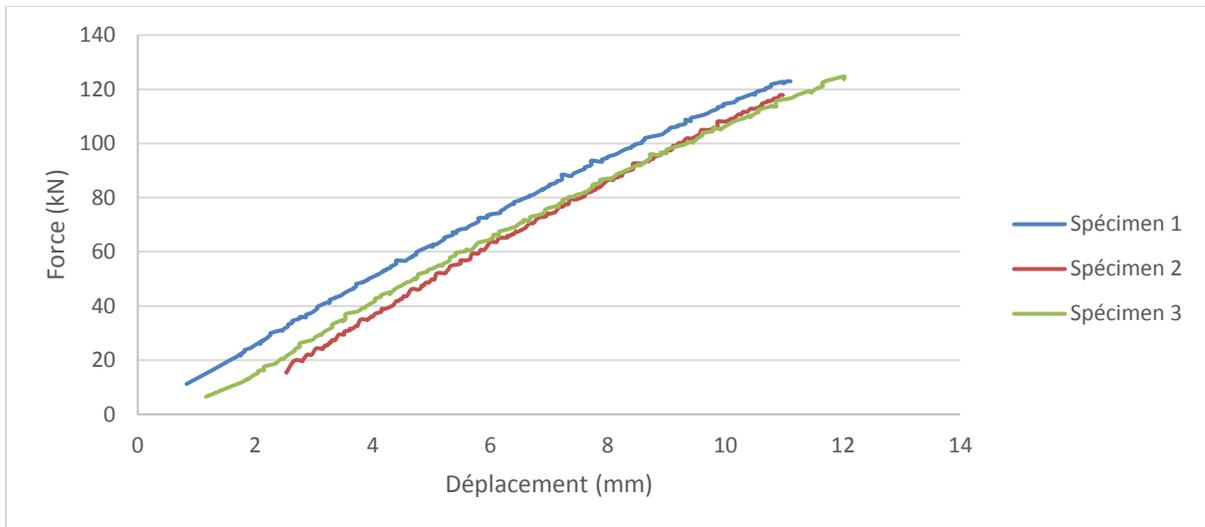


Figure 5-6 – Courbe force-déplacement (barres #5 de type A avec  $l_a^* = 12d$ )

#### 5.2.4 Influence du type de barre sur le mode de rupture et la résistance

Pour la plupart des barres testées, que ce soit avec la nouvelle méthode d'essai ou avec la méthode d'essai B.5, la rupture est intervenue dans la partie courbe près de la jonction avec la partie rectiligne. La Figure 5-7 montre 5 barres pour lesquelles ce mode de rupture s'est produit. Ce sont des barres #5 (diamètre 15 mm) qui ont toutes été testées avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$ .



(a) Vue d'ensemble  
 (b) Détails  
 Figure 5-7 - Rupture dans la partie courbe près de la jonction avec la partie rectiligne

Cependant, même si ce mode de rupture prédomine, il n'est pas représentatif de l'ensemble des spécimens testés. En effet, au vu des résultats des essais, le mode de rupture et la résistance dans la partie courbe des barres varient selon le type de barre :

- **Barres de type A, B et C :**

Avec les barres de type A, B et C, la rupture survient toujours dans la partie courbe, près de la jonction entre la partie courbe et la partie rectiligne (excepté les barres #8 de type C pour lesquelles les essais ont conduit à la rupture du bloc de béton, cf. 5.2.8). D'après les résultats des essais avec la méthode d'essai B.5 et a fortiori avec la nouvelle méthode, la résistance dans la partie courbe des barres de type B est relativement plus importante que celle des barres de type C. Cela s'explique par la différence de résistance intrinsèque entre ces deux types de barres. En effet, d'après les données des fabricants, la résistance à la traction (dans la partie rectiligne) des barres de type B est plus importante que celle des barres de type C.

- **Barres de type D :**

Avec les barres de type D, la plupart des essais ont conduit à la rupture du bloc de béton, que ce soit avec la méthode d'essai B.5 ou avec la nouvelle méthode d'essai. La Figure 5-8 montre deux exemples de rupture du bloc de béton lors d'un essai, l'un avec la nouvelle méthode d'essai et l'autre avec la méthode d'essai B.5 :



(a) avec la nouvelle méthode

(b) avec la méthode B.5

Figure 5-8 - Rupture du bloc de béton lors d'un essai

Ce mode de rupture pourrait être expliqué par le fait que la résistance dans la partie courbe des barres de type D est relativement plus importante par rapport aux autres types de barres, à tel point que le bloc de béton se brise avant que la charge conduisant à la rupture de la barre ne soit atteinte. Cependant, un examen plus précis des spécimens testés conduit à une toute autre explication. En effet, après avoir extrait les barres des blocs de béton, il apparaît que les barres sont effectivement brisées bien que le bloc de béton se soit fissuré. En fait, les barres ne sont pas sectionnées transversalement mais fissurées longitudinalement. La rupture se produit en cisaillement le long de la barre dans la partie courbe, car les fibres à l'extérieur de la courbure sont tendues alors que celles à l'intérieur de la courbure sont moins sollicitées en tension et

comprimées par le béton. Cette hypothèse est corroborée par la présence de fissures le long de la barre dans la partie courbe (cf. Figure 5-9).



*Figure 5-9 - Fissures longitudinales dans la partie courbe des barres de type D*

De plus, le béton est écrasé par les nervures de la barre à l'intérieur de la courbure, mais le béton reste intact à l'extérieur de la courbure (cf. Figure 5-10). Il a également été remarqué que le béton en dessous de la barre était soulevé et parfois brisé, ce qui montre que la barre est plutôt sollicitée en flexion : lorsqu'on exerce un effort de traction sur la partie rectiligne de la barre, la partie ancrée dans le béton résiste et se soulève jusqu'à éclater le béton (cf. Figure 5-8(b) et Figure 5-9).



*Figure 5-10 - Etat de la surface du béton en contact avec la partie courbe*

Ce mode de rupture particulier est dû au procédé de fabrication des barres de type D. D'une part, il semble que le fait de polymériser la résine après avoir introduit les fibres dans un tube de plastique permet d'augmenter la résistance dans la partie courbe des barres. D'autre part, le fait que le tube de revêtement soit crénelé augmente considérablement l'adhérence entre la barre et le béton, ce qui explique la fissuration du bloc de béton et la rupture des barres par cisaillement longitudinal.

#### **- Barres de type E :**

Avec les barres de type E, la rupture se produit toujours dans la partie courbe. Même si le procédé de fabrication des barres de type E est similaire à celui des barres de type D, les barres

de type E présentent une résistance dans la partie courbe inférieure. En effet, comme cela a été évoqué aux chapitres 4.3 et 4.5, le lot de barres de type E qui a été testé présentait un défaut de fabrication qui est sans doute responsable de cette plus faible résistance. Cela explique que la rupture des barres de type E intervienne dans la partie courbe par sectionnement et non pas par cisaillement comme les barres de type D.

Le Tableau 5.5(a), respectivement Tableau 5.5(b), présente les résultats de résistance dans la partie courbe des barres #5 avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$  obtenus avec la méthode d'essai B.5, respectivement avec la nouvelle méthode d'essai :

Tableau 5.5 - Résistance dans la partie courbe des barres #5,  $l_a^* = 12d$   
(a) Méthode d'essai B.5

Type de barre		A	B	C	D	E
Résistance dans la partie courbe $f_b$ (MPa)	moyenne	529.1	769.1	631.3	636.0	591.7
	écart type	51.2	74.9	13.1	53.7	50.7
	coeff. var.	9.7%	9.7%	2.1%	8.4%	8.6%

(b) Nouvelle méthode d'essai

Type de barre		A	B	C	D	E
Résistance dans la partie courbe $f_b$ (MPa)	moyenne	630.3	800.8	563.4	805.0	495.6
	écart type	53.4	73.4	46.3	30.5	51.4
	coeff. var.	8.5%	9.2%	8.2%	3.8%	10.4%

La Figure 5-11 montre les courbes force-déplacement mesurées pour des barres #5 de différents types (A, D et E), avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$ . Ces courbes représentent bien la différence de résistance dans la partie courbe entre ces trois types de barres. Pour une charge de traction donnée, le déplacement des barres de type D est plus faible. Cela démontre que les barres de type D développent une meilleure adhérence avec le béton par rapport aux autres types de barres, ce qui explique leur mode de rupture particulier et leur résistance plus importante.

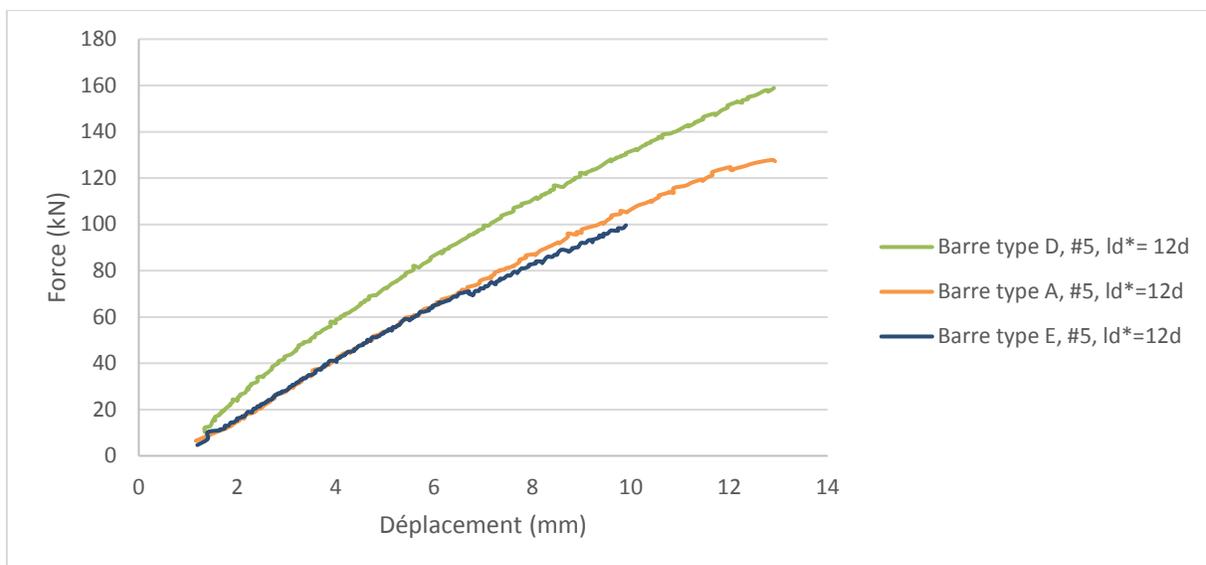


Figure 5-11 - Relation force-déplacement (barres #5,  $l_d^* = 12d$ )

### 5.2.5 Influence du renforcement du bloc de béton

Le Tableau 5.6 présente les résultats de résistance dans la partie courbe des barres #6 de types D et B, obtenus en testant avec la nouvelle méthode d'essai des spécimens avec et sans renforcement :

Tableau 5.6 - Résistance dans la partie courbe des barres #6

Type de barre		D		B	
renforcement		avec	sans	avec	sans
Résistance dans la partie courbe $f_b$ (MPa)	moyenne	677.8	682.4	633.8	639.7
	écart type	30.1	32.1	66.9	27.3
	coeff. var.	4.4%	4.7%	10.6%	4.3%

Pour les barres de type B, l'ajout de cages d'armatures en acier dans les blocs de béton a peu d'influence car le mode de rupture reste le même (cf. Figure 5-14) et l'écart relatif de résistance entre les spécimens renforcés et ceux non renforcés est inférieur à 1%. Les courbes force-déplacement de la Figure 5-12 confirment ce constat, car les données mesurées sur les spécimens avec et sans renforcement sont équivalentes.

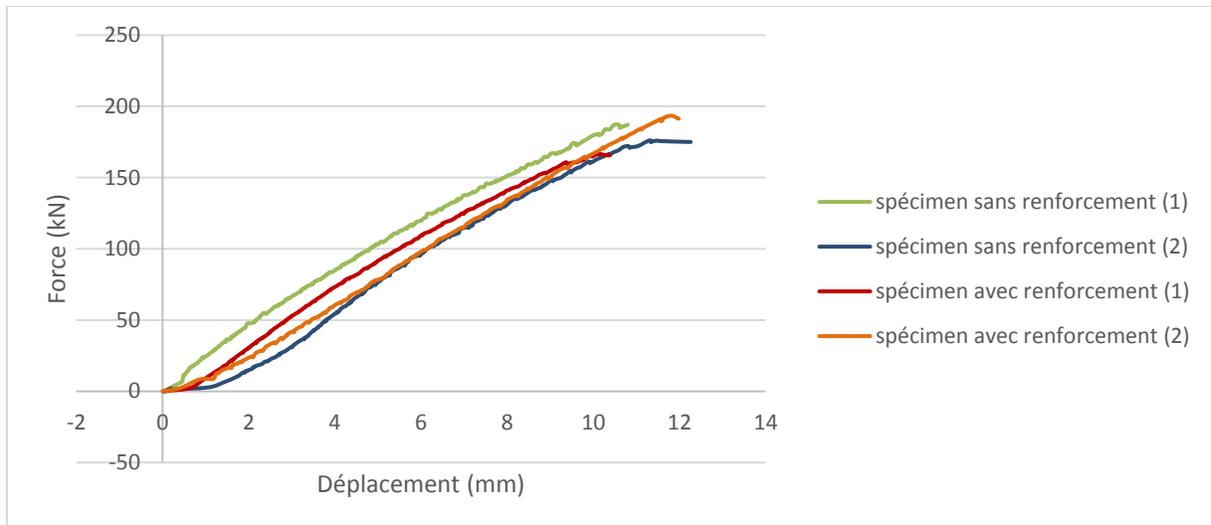


Figure 5-12 - Relation force-déplacement (barres #6 de type B, avec et sans renforcement)

En revanche, pour les barres de type D, l'ajout d'armatures a permis d'éviter la fissuration des blocs de béton. Le renforcement des blocs de béton a même permis d'atteindre la rupture complète des barres de type D, qui ont été sectionnées dans la partie courbe (cf. Figure 5-14). Néanmoins, même si les blocs de béton non renforcés se sont fissurés lors des essais, les barres étaient effectivement brisées bien que la rupture ne soit pas apparente. En fait, le fait de renforcer le bloc de béton ne modifie pas vraiment le mode de rupture des barres de type D. Les barres sont toujours fissurées longitudinalement par cisaillement, mais comme le bloc de béton est moins fissuré grâce au renforcement, la barre reste ancrée et un chargement résiduel peut être appliqué. Ce chargement résiduel conduit à la rupture complète de la barre qui est sectionnée. C'est d'ailleurs ce que montrent les courbes force-déplacement (cf. Figure 5-13) : que le bloc de béton soit renforcé ou non, le comportement des spécimens jusqu'à la rupture est similaire, mais les spécimens renforcés permettent d'appliquer un chargement résiduel. De plus, la résistance ultime des barres reste quasiment inchangée que le bloc de béton se soit brisé ou non. L'écart relatif de résistance entre les spécimens renforcés et ceux non renforcés est en effet inférieur à 1%. Par conséquent, les résultats obtenus durant les essais pour lesquels les blocs de béton se sont brisés sont tout de même validés.

En conclusion, au vu du faible écart des résultats pour les blocs avec et sans renforcement, l'influence du renforcement des blocs de béton est négligeable, quel que soit le type de barre.

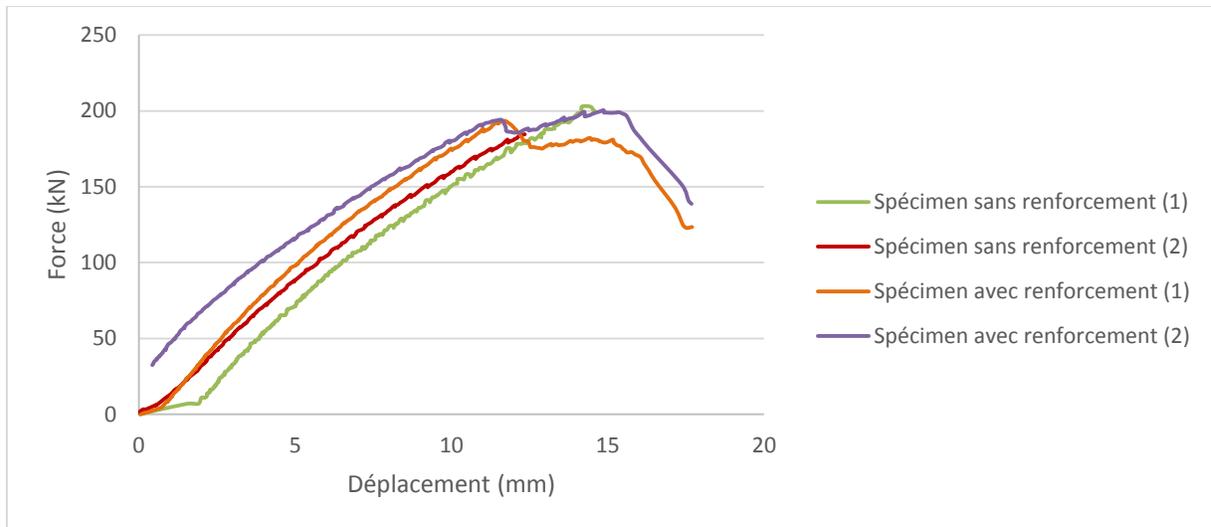


Figure 5-13 - Relation force-déplacement (barres #6 de type D, avec et sans renforcement)



Figure 5-14 - Mode de rupture des barres #6 de types B et D, avec renforcement du bloc de béton

### 5.2.6 Influence de la longueur d'ancrage

Le Tableau 5.7 présente les résultats obtenus avec la nouvelle méthode en testant des barres #5 de types B et D avec différentes longueurs d'ancrage. Au vu de ces résultats, il apparaît que la longueur d'ancrage influence peu la résistance des barres de type B. En effet, la dispersion moyenne des résultats pour les différentes longueurs d'ancrage est seulement de 6.5% pour ce type de barre. Comme cela a été évoqué plus haut (cf. 5.2.4), la rupture des barres de type B se produit toujours dans la partie courbe et la barre est sectionnée transversalement. Ainsi, tant que la longueur d'ancrage est suffisante pour assurer une bonne adhérence entre la barre en PRFV et le béton, la résistance dans la partie courbe reste quasiment constante. Toutefois, pour les plus faibles longueurs d'ancrage (entre  $l_d^* = 3d$  et  $l_d^* = 10d$ ), la résistance dans la partie courbe augmente légèrement lorsque la longueur d'ancrage augmente, car le fait d'augmenter la longueur d'ancrage améliore l'adhérence entre la barre en PRFV et le béton, et évite que la

rupture soit précipitée à cause du glissement entre la barre et le béton. Cependant, à partir d'une certaine longueur d'ancrage (entre  $l_a^* = 10d$  et  $l_a^* = 15d$ ), la résistance dans la partie courbe diminue légèrement lorsque la longueur d'ancrage augmente. Cela s'explique par le fait qu'à partir d'une certaine longueur d'ancrage, l'adhérence entre la barre en PRFV et le béton est tel que les contraintes se concentrent davantage dans la partie courbe de la barre.

En ce qui concerne les barres de type D, les résultats des essais indiquent que la résistance dans la partie courbe est davantage influencée par la longueur d'ancrage. En effet, la dispersion des résultats pour les différentes longueurs d'ancrage atteint 14% pour ce type de barre. De plus, le mode de rupture des spécimens varie selon la longueur d'ancrage :

- avec  $l_a^* = 3d$ , les spécimens ont cédé sans rupture apparente de la barre ni fissuration du bloc de béton. La rupture s'est en fait produite le long de la partie courbe de la barre, par cisaillement ;
- avec  $l_a^* = 6d$ , deux modes de rupture ont été observés : rupture du bloc de béton ou rupture du spécimen sans rupture apparente de la barre ni fissuration du bloc de béton ;
- avec  $l_a^* = 10d$ , il a également été observé deux modes de rupture différents : rupture du bloc de béton ou bien rupture de la barre qui a été sectionnée transversalement dans la partie courbe ;
- avec  $l_a^* = 12d$ , tous les spécimens testés ont subi une rupture du bloc de béton ;
- avec  $l_a^* = 15d$ , deux modes de rupture ont été observés : rupture de la barre sectionnée transversalement ou bien rupture du spécimen mais sans rupture apparente de la barre ni fissuration du bloc de béton.

Les causes de ces différents modes de ruptures sont les suivantes :

- pour une faible longueur d'ancrage ( $l_a^* = 3d$ ), la barre se brise par cisaillement à l'intérieur du bloc de béton sans que le bloc de béton soit fissuré, car l'adhérence entre la barre et le béton est trop faible pour que la pression de la barre sur le béton n'entraîne la fissuration du bloc de béton. La résistance dans la partie courbe de la barre est plus faible avec une petite longueur d'ancrage car les contraintes sont concentrées sur une plus petite longueur et directement dans la partie courbe ;
- pour une longueur d'ancrage moyenne ( $l_a^* = 6d, 10d$  et  $12d$ ), selon la résistance intrinsèque du spécimen testé (c'est-à-dire la résistance combinée de la barre et du bloc

de béton), soit le bloc de béton se rompt sous la pression exercée par la barre, soit la barre se brise par cisaillement à l'intérieur du bloc de béton sans que la barre soit sectionnée ni que le bloc de béton soit fissuré, soit la barre se brise en étant sectionnée transversalement. Pour ces valeurs de longueur d'ancrage, la résistance dans la partie courbe augmente lorsque la longueur d'ancrage augmente, car le fait d'augmenter la longueur d'ancrage permet de mieux répartir les contraintes le long de la barre ;

- pour une longueur d'ancrage importante ( $l_a^* = 15d$ ), la pression exercée par la barre sur le béton est répartie sur une plus grande longueur, donc le bloc béton ne se brise pas mais c'est la barre qui cède par cisaillement le long de la partie courbe. La résistance dans la partie courbe est plus faible lorsque la longueur d'ancrage est importante, car l'adhérence entre la barre en PRFV et le béton est telle que le cisaillement longitudinal dans la partie courbe est amplifié.

Tableau 5.7 - Résistance dans la partie courbe pour différentes longueurs d'ancrage

Type de barre		D					B				
Longueur d'ancrage $l_a^*$		3d	6d	10d	12d	15d	3d	6d	10d	12d	15d
Résistance dans la partie courbe $f_b$ (MPa)	moyenne	546.0	675.5	733.5	805.0	741.3	718.5	735.4	821.2	800.8	716.3
	écart type	33.6	101.7	62.0	30.5	1.0	12.2	84.7	43.4	73.4	32.2
	coeff. var.	6.1%	15.1%	8.5%	3.8%	0.1%	1.7%	11.5%	5.3%	9.2%	4.5%

La Figure 5-15 représente les courbes force-déplacement mesurées pour des barres #5 de type D, avec des longueurs d'ancrage  $l_a^* = 12d$  et  $l_a^* = 15d$ . La comparaison des courbes force-déplacement corrobore l'interprétation du comportement des barres de type D et de l'influence de la longueur d'ancrage. En effet, lorsque la longueur d'ancrage est importante ( $l_a^* = 15d$ ), l'adhérence entre la barre en PRFV et le béton est telle que l'extrémité de la barre qui est ancrée dans le bloc de béton est parfaitement bloquée. Par conséquent, c'est la partie rectiligne verticale dé-liaisonnée du béton qui glisse et se déforme sous la sollicitation de traction. Le capteur de déplacement étant situé à l'extrémité de cette partie rectiligne verticale, le déplacement mesuré au début de l'essai est plus important. En revanche, lorsque la longueur d'ancrage est plus faible ( $l_a^* = 12d$ ), l'extrémité de la barre ancrée dans le bloc de béton peut légèrement glisser. Par conséquent, le déplacement de la barre est davantage réparti le long de la barre et le déplacement mesuré à l'extrémité verticale est donc plus faible.

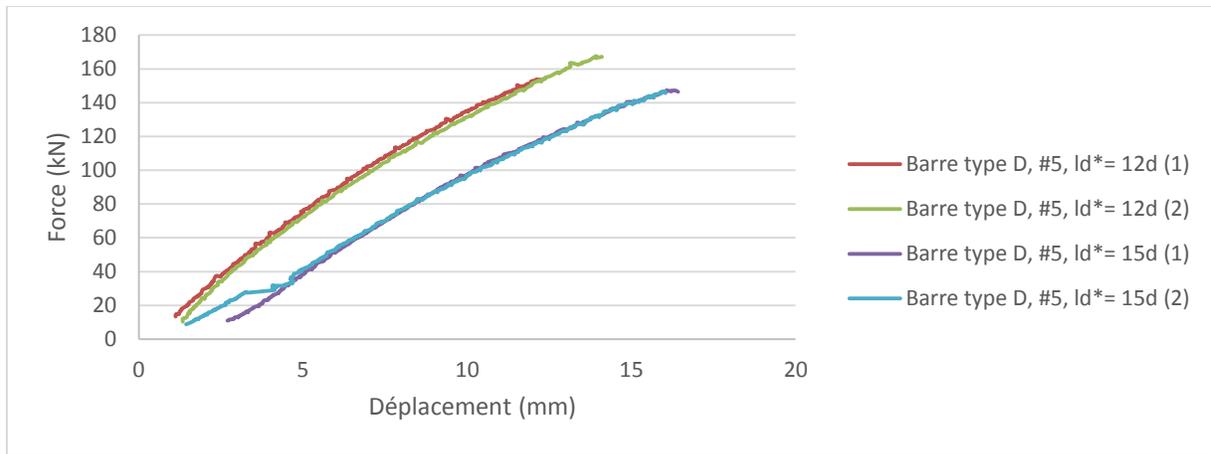


Figure 5-15 - Relation force-déplacement pour différentes longueurs d'ancrage (barres #5 de type D)

### 5.2.7 Utilisation d'un béton haute performance à prise rapide

Le Tableau 5.8 présente les valeurs moyennes de résistance des six spécimens conçus avec un béton haute performance à prise rapide (dont la résistance à la compression atteint 45 MPa après 72 heures), et compare ces résultats avec ceux obtenus avec un béton de mélange standard (dont la résistance à la compression atteint 35 MPa après 28 jours). L'écart relatif entre les deux types de béton est inférieur à 2%. Par conséquent, les résultats obtenus avec un béton haute performance à prise rapide sont quasi identiques à ceux obtenus avec un béton de mélange standard.

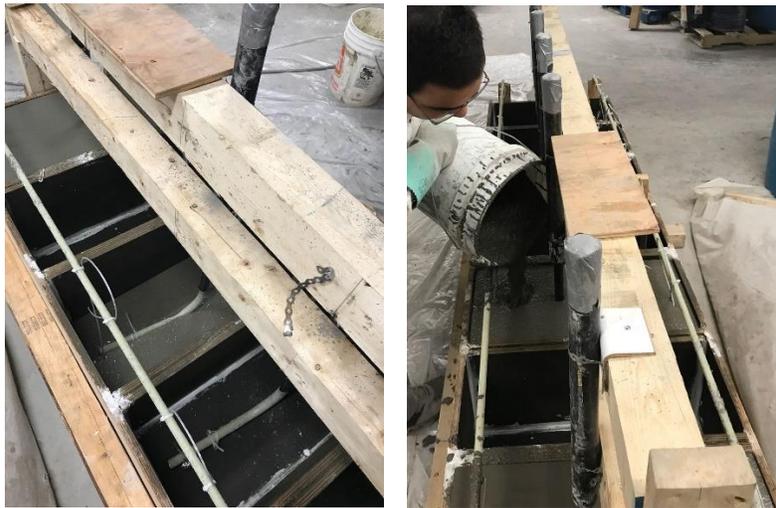
Tableau 5.8 - Résistance des spécimens avec un béton haute performance à prise rapide

Résistance dans la partie courbe (MPa)	Barre #5	Barre #6
Béton mélange standard	800.8	639.7
Béton haute performance à prise rapide	785.4	652.5
Ecart relatif	1.9%	-2.0%

Ainsi, l'utilisation d'un béton haute performance à prise rapide, dont la résistance à la compression atteint 45 MPa après 72 heures, est validée pour la conception des spécimens de la nouvelle méthode de test. Même si le béton haute performance à prise rapide est relativement plus onéreux par rapport à un béton de mélange standard, la mise en œuvre d'un tel béton est plus pratique car le béton est fourni sous forme de sacs prêts à l'emploi : le ciment et les granulats sont déjà dosés, il ne reste plus qu'à ajouter de l'eau et mélanger. De plus, l'utilisation d'un béton à prise rapide rend beaucoup plus aisée la planification des essais sur site, car le délai entre la fabrication des spécimens et la réalisation des essais est considérablement raccourci.



*(a) Coffrages avant la coulée du béton*



*(b) coulée du béton haute performance à prise rapide*



*(c) Coffrages après la coulée du béton*

*Figure 5-16 – Préparation et coulée du béton haute performance à prise rapide*



Figure 5-17- Rupture de barres coulé avec béton haute performance à prise rapide

### 5.2.8 Influence du diamètre de la barre

Le Tableau 5.9 donne les valeurs de résistance dans la partie courbe mesurée avec la nouvelle méthode d'essai pour différents diamètres et différents types de barres. Compte tenu de la faible dispersion des résultats pour l'ensemble des diamètres testés, la nouvelle méthode d'essai est validée pour mesurer la résistance dans la partie courbe des barres en PRFV de manière fiable et précise, quel que soit le diamètre de la barre testée. Cette analyse est avérée pour les barres de diamètre #6 et inférieur, toutefois des précautions doivent être prises pour les barres de diamètre supérieur à 20 mm.

Tableau 5.9 - Résistance dans la partie courbe pour différents diamètres de barre

Résistance dans la partie courbe $f_b$ (MPa)		Diamètre			
		#3	#4	#5	#6
Type de barre	type B	-	628.4	800.8	636.8
	type C	484.5	675.0	563.4	-
	type D	-	808.8	805.0	680.1



Figure 5-18 - Mode de rupture des barres #4 et #3

En effet, concernant les barres #8 (diamètre 25 mm) de type C, les essais avec la nouvelle méthode ont conduit à la rupture du bloc de béton pour l'ensemble des 5 spécimens testés. La fissuration a commencé au niveau de la barre puis s'est propagée verticalement jusqu'à la face supérieure du spécimen, jusqu'à rupture complète du bloc de béton. La rupture du béton s'est produite prématurément lorsque la charge appliquée atteignait entre 90 et 100 kN, ce qui est inférieur à la capacité d'adhérence du béton. Les barres en PRFV n'étaient pas brisées à l'issue des essais. La Figure 5-19 montre les blocs de béton brisés suite à l'essai des barres #8 avec la nouvelle méthode d'essai.



Figure 5-19 - Blocs de béton brisés suite à l'essai de barres #8

Afin de tester les barres #8, et plus largement les barres de diamètre supérieur à 20 mm, il est donc recommandé de renforcer le bloc de béton avec une cage d'armature en acier ou bien d'augmenter les dimensions du bloc de béton pour augmenter le confinement. Ces mesures devraient permettre au béton de résister à la contrainte de traction exercée par la barre en PRFV, et donc d'empêcher la rupture prématurée du bloc de béton avant que la résistance ultime de la barre en PRFV soit atteinte.

### 5.2.9 Influence du taux de chargement

Le Tableau 5.10 compare la résistance dans la partie courbe des barres #5 de type B testées avec différents taux de chargement. L'écart relatif entre les résultats reste inférieur à 5%, donc le taux de chargement n'exerce pas une grande influence sur la résistance mesurée avec la nouvelle méthode d'essai. Par conséquent, il est recommandé de mettre en œuvre la nouvelle méthode d'essai en utilisant un taux de chargement de 250 MPa/min ou bien un taux de chargement qui permette d'atteindre une rupture du spécimen après 1 à 10 minute d'essai.

Tableau 5.10 - Résistance dans la partie courbe pour différents taux de chargement

Taux de chargement (MPa/min)	500	250	125	62.5
Résistance dans la partie courbe (MPa)	797.0	800.8	803.0	835.7

### 5.2.10 Répartition des contraintes le long de la barre

Afin d'étudier la répartition des contraintes le long de la barre en PRFV lors d'un essai avec la nouvelle méthode, quelques spécimens ont été équipés de jauges de déformation. La Figure 5-20 indique l'emplacement des trois capteurs placés le long de la partie courbe de la barre.

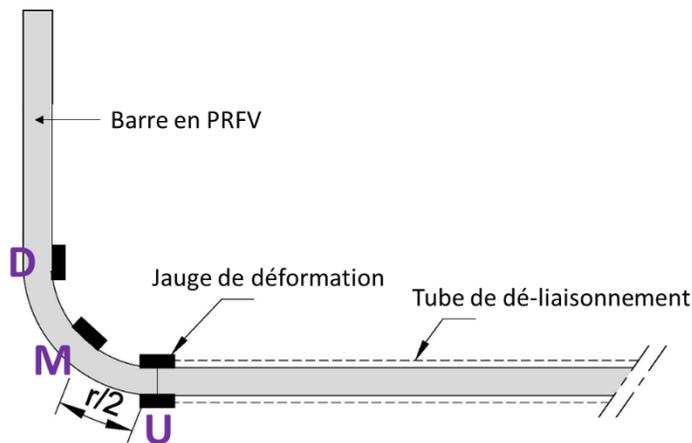
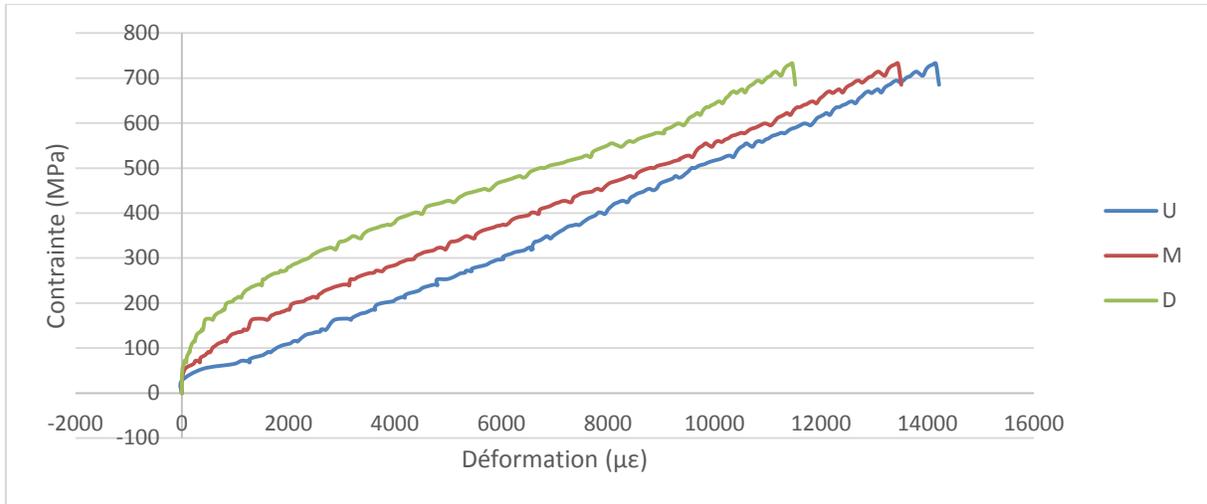
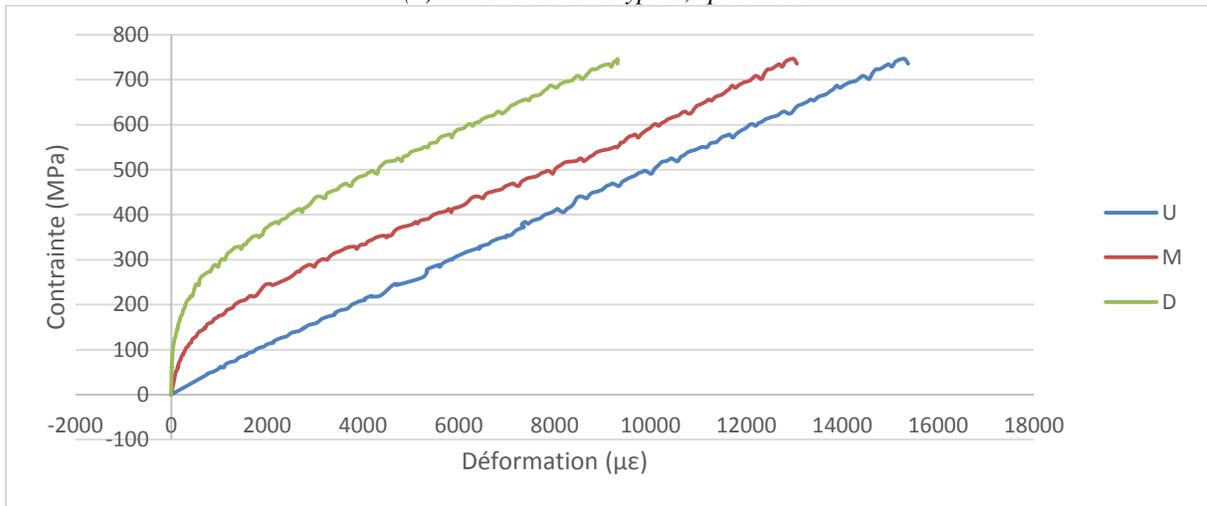


Figure 5-20 - Emplacement des jauges de déformation le long de la barre

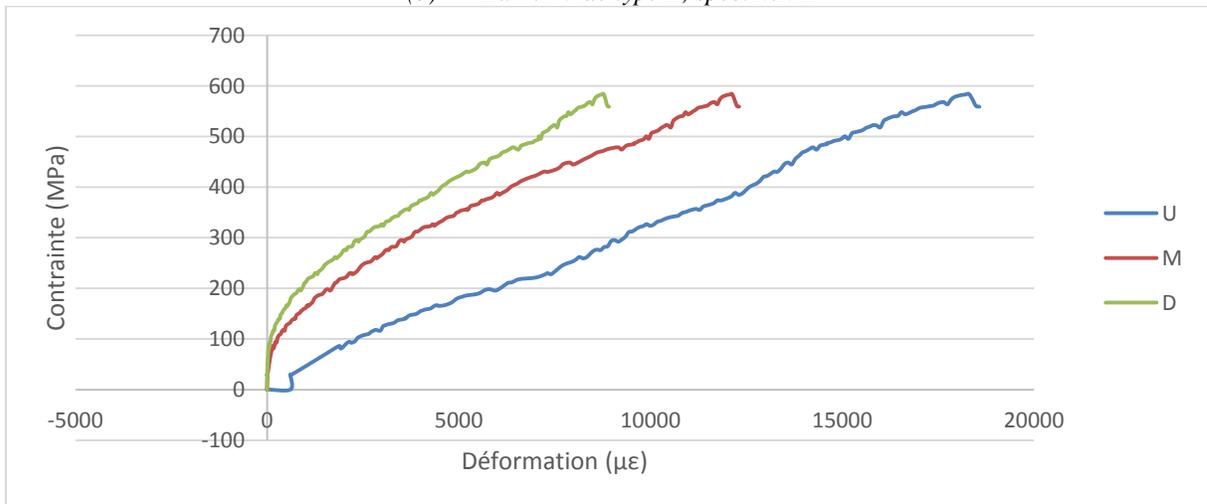
La Figure 5-21 représente les courbes contrainte-déformation obtenues lors de l'essai de deux barres #5 et d'une barre #4 de type B. L'allure linéaire des courbes correspond bien au comportement linéaire du PRFV. Pour l'ensemble des barres testées, la déformation est plus importante au début de la partie courbe (au niveau du capteur U), si bien que la partie la plus ancrée dans le béton (au niveau du capteur D) est plus rigide et moins sollicitée. En fait, lors de l'application du chargement sur la barre, c'est d'abord la zone près de la jonction avec la partie rectiligne (capteur U) qui se déforme, puis la zone au milieu de la partie courbe (capteur M) et enfin la zone près de la partie ancrée dans le béton (capteur D). Ce constat explique le mode de rupture observé pour la plupart des barres testées avec la nouvelle méthode : la rupture est intervenue dans la partie courbe près de la jonction avec la partie rectiligne.



(a) Barre #5 de type B, spécimen 1



(b) Barre #5 de type B, spécimen 2



(c) Barre #4 de type B

Figure 5-21 - Relations contrainte-déformation le long de barres testées avec la nouvelle méthode d'essai

### 5.2.11 Comparaison des méthodes d'essai

Le Tableau 5.11 présente les valeurs moyennes de résistance dans la partie courbe mesurées avec la méthode d'essai B.5 et la nouvelle méthode d'essai, pour chaque type de barres (barres #5 avec une longueur d'ancrage  $l_d^* = 12d$ ) :

Tableau 5.11 - Comparaison des résultats entre la méthode d'essai B.5 et la nouvelle méthode d'essai

Résistance moyenne dans la partie courbe (MPa)	Méthode d'essai B.5	Nouvelle méthode d'essai	Ecart relatif
Barres de type A	529.1	630.3	-19.1%
Barres de type B	769.1	800.8	-4.1%
Barres de type C	600.7	563.4	6.2%
Barres de type D	636.0	805.0	-26.6%
Barres de type E	591.7	495.7	16.2%

L'écart relatif moyen pour l'ensemble des types de barres indique que les résultats obtenus avec la nouvelle méthode d'essai sont en moyenne 5% plus élevés que ceux obtenus avec la méthode d'essai B.5. La résistance dans la partie courbe mesurée avec la nouvelle méthode d'essai est donc globalement plus élevée qu'avec la méthode B.5. Ce constat portant sur l'ensemble des résultats mesurés doit toutefois être relativisé, car les écarts relatifs entre les résultats obtenus avec les deux méthodes d'essais dépendent beaucoup du type de barre :

- pour les barres de type A, l'écart relativement élevé (près de 20%) indique que la nouvelle méthode d'essai permet d'atteindre une résistance dans la partie courbe notablement plus élevée par rapport à la méthode d'essai B.5. Cela est dû à la manière dont sont fabriquées les barres de type A, qui influence leur mode de rupture (cf. 5.2.4). En effet, les barres de type A étant produites en assemblant des segments distincts, la jonction entre les segments est un point faible où la rupture est plus susceptible de se produire. Or, la méthode B.5 peut provoquer une concentration des sollicitations sur un des deux étriers testés, à cause de la configuration du dispositif expérimental qui implique inévitablement des erreurs d'alignement (cf. 5.1). Par conséquent, lorsqu'une barre de type A est testée avec la méthode d'essai B.5, les contraintes se concentrent à la jonction entre les parties rectiligne et courbe, ce qui provoque la rupture prématurée de la barre et donc une résistance mesurée plus faible ;
- pour les barres de types B et C, l'écart relatif entre les deux méthodes d'essais est plus faible (inférieur à 10%). En effet, le procédé de fabrication commun à ces deux types de barres ne crée pas particulièrement de point faible à la jonction entre la partie rectiligne

et la partie courbe. Par conséquent, les contraintes sont mieux réparties le long de la partie courbe et la rupture intervient toujours dans la partie courbe, que les barres soient testées avec la méthode B.5 ou avec la nouvelle méthode. Pour les barres de types B et C, les résultats des essais avec les deux méthodes sont donc similaires ;

- pour les barres de type D, l'écart relativement élevé (plus de 25%) indique que la nouvelle méthode d'essai permet d'atteindre une résistance dans la partie courbe remarquablement plus élevée par rapport à la méthode d'essai B.5. Là aussi, cela est dû à la manière dont sont fabriquées ces barres. En effet, le procédé de fabrication confère aux barres de type D une résistance plus importante dans la partie courbe et le tube de revêtement améliore l'adhérence entre la barre et le béton. Or, dans le cas de la méthode d'essai B.5, chaque bloc de béton contient deux étriers. Par conséquent, la pression exercée par les barres sur le béton est beaucoup plus importante avec la méthode d'essai B.5 qu'avec la nouvelle méthode d'essai, et cela provoque une rupture prématurée du bloc de béton. Avec la nouvelle méthode d'essai, le bloc de béton est moins sollicité et la barre en PRFV peut atteindre sa pleine résistance ;
- pour les barres de type E, l'écart relatif indique que la nouvelle méthode d'essai ne permet d'atteindre une résistance dans la partie courbe aussi élevée qu'avec la méthode d'essai B.5. Cependant, les résultats obtenus avec les barres de type E sont discutables compte tenu du défaut de qualité du lot testé (cf. 4.3 et 4.5). Le fabricant a été averti de ce problème et a envoyé un nouveau lot de barres. De nouveaux essais avec ce nouveau lot de barres de type E devraient fournir des résultats plus probants mais ne feront toutefois pas partie de cette étude.

### 5.3 Bilan des essais mécaniques

- La nouvelle méthode d'essai est plus pratique à mettre en œuvre que la méthode d'essai B.5 car les spécimens comprennent une seule barre en PRFV et un seul bloc de béton ;
- Les premières phases d'essais ont démontré la fiabilité de la nouvelle méthode d'essai, car la dispersion des résultats reste inférieure à 15% quelle que soit la configuration ;
- Pour la plupart des spécimens testés, la rupture est intervenue dans la partie courbe des barres en PRFV, près de la jonction entre la partie rectiligne et la partie courbe ;

- Les barres de type D présentent un mode de rupture particulier, par cisaillement le long de la partie courbe. Ce mode de rupture spécial est dû au procédé de fabrication de ces barres, qui leur confère une résistance plus élevée dans la partie courbe et surtout qui améliore grandement l'adhérence entre la barre et le béton ;
- Le fait de renforcer le bloc de béton avec une cage d'armatures en acier n'influence pas la résistance mesurée lors des essais avec la nouvelle méthode. Le renforcement des blocs de béton permet seulement d'atteindre la rupture complète des barres, mais la charge ultime supportée par les barres reste la même. Ce constat permet de valider les résultats obtenus lors des essais pour lesquels les blocs de béton se sont fissurés, notamment avec des barres de type D ;
- La longueur d'ancrage n'est pas un paramètre très influent pour la résistance des barres de type B. Néanmoins, pour les plus faibles longueurs d'ancrage, le fait d'augmenter la longueur d'ancrage améliore l'adhérence entre la barre en PRFV et le béton, ce qui augmente légèrement la résistance mesurée. Par contre, pour des longueurs d'ancrage plus élevées, l'adhérence entre la barre et le béton est telle que les contraintes se concentrent davantage dans la partie courbe de la barre, ce qui diminue légèrement la résistance mesurée ;
- Pour les barres de type D, la longueur d'ancrage est un paramètre qui détermine le mode de rupture des spécimens et influence la résistance dans la partie courbe des barres. Pour une faible longueur d'ancrage, la rupture se produit par cisaillement le long de la partie courbe de la barre, sans que le bloc de béton soit fissuré. Pour des longueurs d'ancrage intermédiaires, le mode de rupture dépend de la résistance intrinsèque du spécimen, et la résistance dans la partie courbe augmente lorsque la longueur d'ancrage augmente car le fait d'augmenter la longueur d'ancrage permet de mieux répartir les contraintes le long de la barre. Pour une longueur d'ancrage importante, l'adhérence entre la barre en PRFV et le béton est telle que le cisaillement longitudinal dans la partie courbe est amplifié, si bien que la résistance mesurée est plus faible ;
- L'utilisation d'un béton haute performance à prise rapide, dont la résistance à la compression atteint 45 MPa après 72 heures, est validée pour concevoir les blocs en béton de la nouvelle méthode d'essai ;

- La nouvelle méthode d'essai est validée quel que soit le diamètre des barres testées. Toutefois, des précautions doivent être prises pour les barres de diamètre supérieur à 20 mm, notamment en renforçant le bloc de béton avec des armatures ou en augmentant les dimensions du bloc de béton afin d'éviter sa rupture ;
- Le taux de chargement n'exerce pas une grande influence sur la résistance mesurée avec la nouvelle méthode d'essai. Par conséquent, il est recommandé de mettre en œuvre la nouvelle méthode d'essai en utilisant un taux de chargement de 250 MPa/min ou bien un taux de chargement qui permette d'atteindre une rupture du spécimen après 1 à 10 minute d'essai.
- L'étude de la répartition des contraintes le long de la barre montre que c'est la zone située près de la jonction avec la partie rectiligne qui est la plus sollicitée, ce qui explique le mode de rupture observé pour la plupart des barres testées ;
- La résistance dans la partie courbe mesurée avec la nouvelle méthode d'essai est globalement plus élevée qu'avec la méthode B.5, a fortiori pour les barres de types A et D. La configuration de la méthode d'essai B.5 provoque une concentration des contraintes dans la partie courbe, ce qui conduit à sous-estimer la résistance des barres. La nouvelle méthode d'essai fournit des résultats plus crédibles ;
- Les résultats obtenus pour les barres de type E sont discutables compte tenu du défaut de fabrication du lot testé. De nouveaux essais avec un nouveau lot de barres de type E devraient fournir des résultats plus probants mais ne feront pas partie de cette étude.

Enfin, la nouvelle méthode d'essai est validée car elle est pratique à mettre en place et permet d'obtenir des résultats fiables. Même si le type de barre influence le mode de rupture et la résistance dans la partie courbe, les paramètres testés sont validés. Ainsi, quel que soit le type de barre, un bloc de béton  $300 \times 300 \times 600$  mm sans renforcement avec une longueur d'ancrage  $l_d^* = 12d$  et un taux de chargement de 250 MPa/min conviennent pour les barres #5 et #6. Les phases d'essais suivantes permettront d'étudier l'influence d'autres paramètres et d'affiner la configuration de la nouvelle méthode.

# CHAPITRE 6 ÉTUDE NUMÉRIQUE

## 6.1 Présentation de l'étude numérique

Dans le cadre de cette phase d'étude numérique, le comportement d'une barre courbe en PRFV noyée dans un bloc de béton et soumise à un effort de traction est modélisé par éléments finis. L'objectif est donc de comparer les résultats expérimentaux avec ceux obtenus numériquement et de comprendre plus en détail le mécanisme de rupture. La modélisation par éléments finis permet notamment d'étudier la distribution des contraintes et des déformations ainsi que les zones les plus sollicitées au sein de la barre en PRFV et du bloc de béton. Ainsi, le modèle numérique permet d'examiner précisément le comportement d'un spécimen durant un essai de traction, et peut donc être utilisé pour valider les paramètres expérimentaux de la nouvelle méthode d'essai. C'est le logiciel ABAQUS qui a été utilisé pour créer un modèle par éléments finis en trois dimensions d'un spécimen testé avec la nouvelle méthode d'essai. Les paramètres du modèle ont été définis afin de correspondre fidèlement à la réalité, notamment en ce qui concerne la géométrie du spécimen et les propriétés des matériaux. Une attention particulière a été portée à la modélisation de l'interface entre la barre en PRFV et le béton, afin de rendre compte le plus précisément possible du comportement du spécimen durant l'essai.

## 6.2 Paramètres du modèle

### 6.2.1 Géométrie

La géométrie du modèle reprend les dimensions réelles du spécimen de la nouvelle méthode d'essai. Les deux éléments qui constituent le spécimen, à savoir le bloc de béton et la barre en PRFV, sont modélisés en trois dimensions en tant que solides déformables. Le bloc de béton est modélisé par un parallélépipède rectangle de  $300 \times 300 \times 600$  mm. Les dimensions de la barre correspondent à celle d'une barre #5 (même si le diamètre standard est 15 mm, le diamètre choisi pour le modèle est 16 mm pour correspondre plus exactement au diamètre réel), avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$  (donc 180 mm) et un rayon de courbure de 65 mm. Afin d'assembler les deux éléments, le bloc de béton est percé d'un trou correspondant à l'emplacement de la barre. La barre en PRFV est centrée à l'intérieur du bloc de béton. La Figure 6-1 illustre les dimensions du bloc de béton et de la barre en PRFV.

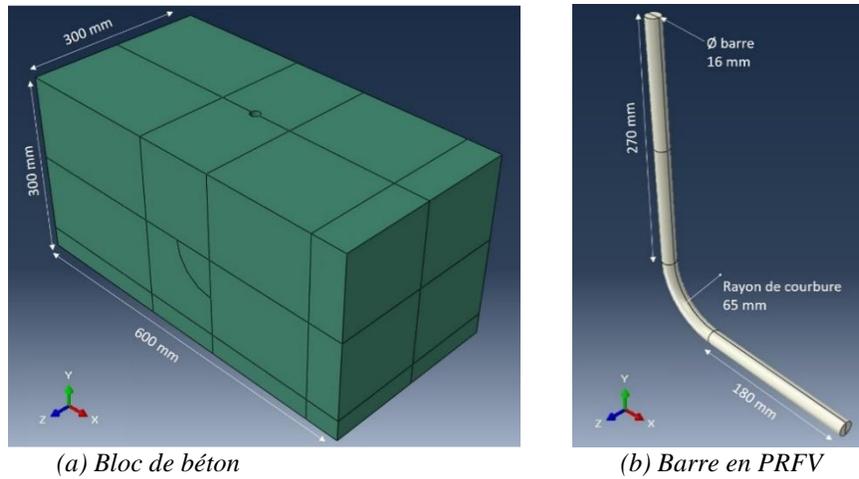


Figure 6-1 - Dimensions du modèle

### 6.2.2 Conditions limites et chargement

Les conditions aux limites ont été définies de manière à reproduire la pression de la plaque d'appui sur le bloc de béton. Ainsi, une partie des nœuds situés sur la face supérieure du bloc de béton sont fixés en translation. La surface d'application de cette condition limite correspond aux dimensions de la plaque d'appui, soit environ  $300 \times 300$  mm. L'effort de traction exercé sur la barre durant l'essai est modélisé en appliquant à l'extrémité de la barre une charge surfacique de 1000 MPa. L'amplitude de la charge a été définie de manière à atteindre la rupture de la barre, en considérant les résultats expérimentaux. En effet, la charge maximale à la rupture qui a été mesuré lors des essais de barres #5 avec la nouvelle méthode est environ 165 kN. En répartissant cette charge sur la section de la barre (à savoir environ  $201 \text{ mm}^2$  pour un diamètre de 16 mm), la charge surfacique correspondante vaut environ 820 MPa. La Figure 6-2 illustre les conditions aux limites et le chargement appliqué au modèle.

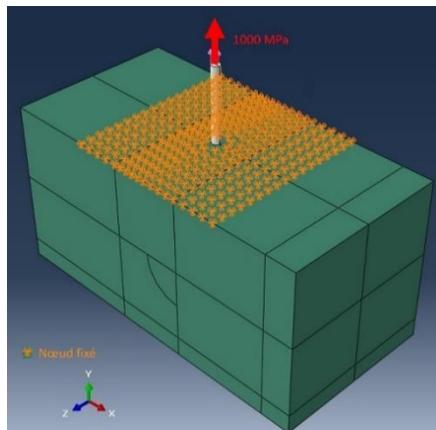


Figure 6-2 - Conditions aux limites et chargement

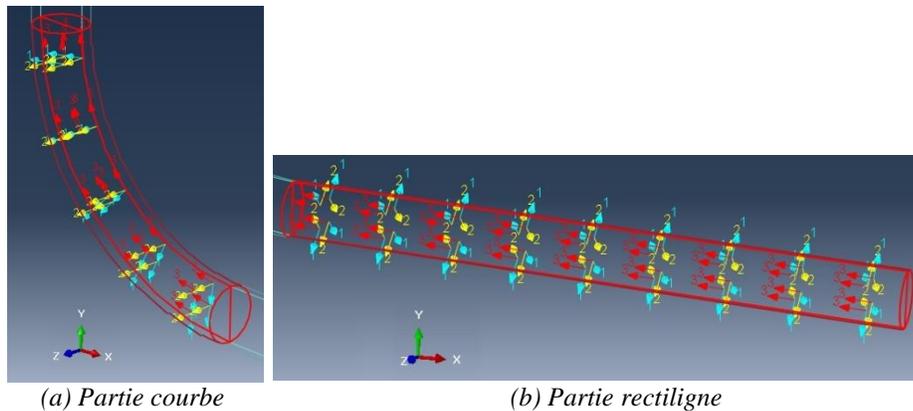
## 6.2.3 Propriétés des matériaux

### Propriétés du PRFV

Les propriétés du PRFV ont été définies en fonction des caractéristiques réelles du matériau. Ainsi, le PRFV est défini comme un matériau élastique mais dont les propriétés sont orthotropes, de manière à prendre en compte la variation de résistance induite par la courbure. Les propriétés du matériau ont été définies d'après les données fournies par le fabricant des barres de type B. Le Tableau 6.1 récence les propriétés mécaniques du PRFV. La direction 3 correspond à la direction longitudinale de la barre, c'est-à-dire la direction des fibres. La Figure 6-3 illustre l'orientation des propriétés orthotropes du PRFV le long de la barre.

Tableau 6.1 – Propriétés mécaniques du PRFV

Modules d'Young (MPa)			Coefficients de Poisson			Coefficient de rigidité (MPa)		
$E_1$	$E_2$	$E_3$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
46000	46000	50000	0.25	0.25	0.25	18400	18400	20000



(a) Partie courbe (b) Partie rectiligne  
Figure 6-3 - Orientation des propriétés du PRFV le long de la barre

Il est complexe de modéliser la rupture fragile d'un matériau à l'aide d'une modélisation par éléments finis, notamment avec le logiciel ABAQUS. Par conséquent, même si le comportement du matériau est en réalité parfaitement élastique, une caractéristique plastique est spécifiée pour le PRFV. La contrainte à partir de laquelle le matériau est considéré comme plastique est définie à 1000 MPa, afin de correspondre à la résistance ultime des barres #5 de type B (d'après les données du fabricant). L'ajout de cette propriété plastique permet seulement de mieux repérer le moment où la contrainte dans la barre atteint la résistance ultime du PRFV, cela n'a aucune influence sur les résultats de la modélisation puisque le comportement plastique de la barre est ignoré.

## Propriétés du béton

Le logiciel ABAQUS propose deux approches différentes pour modéliser le comportement du matériau béton. La première approche est le modèle de « fissuration diffuse » (*concrete smeared crack* ou *CSC*). Avec cette approche, la fissuration du béton intervient lorsque la contrainte principale en tension excède la résistance à la traction du béton. Le module élastique du matériau est alors supposé nul dans la direction parallèle à la direction de la contrainte principale en tension. La deuxième approche est le modèle d'« endommagement plastique » (*concrete damaged plasticity* ou *CDP*). Cette approche permet de considérer les deux modes de rupture du matériau béton, c'est-à-dire la fissuration en tension et l'écrasement en compression. Le modèle *CDP* prend en compte le comportement non linéaire du matériau, à travers des mécanismes de plasticité et d'endommagement.

C'est le modèle *CDP* qui a été choisi car il présente un potentiel de convergence plus élevé par rapport au modèle *CSC* (Obaidat, 2011). Les paramètres requis pour ce modèle sont le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, les paramètres d'endommagement plastique et les données concernant le comportement du matériau en tension et en compression. Le module d'élasticité du béton a été défini selon l'équation de l'ACI 318-08 :

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (6.1)$$

En considérant un béton de résistance à la compression  $f'_c = 35 \text{ MPa}$ , le module d'Young vaut donc environ  $E_c = 27000 \text{ MPa}$ . Le coefficient de Poisson est considéré comme étant égal à 0.2, cette valeur étant reconnue dans la littérature. Les paramètres d'endommagement plastique du modèle *CDP* sont l'angle de dilatation, l'excentricité potentielle de flux, le rapport entre la résistance à l'état bi-axial et la résistance à l'état uniaxial, le rapport des distances entre l'axe hydrostatique et les méridiens de compression et de tension, ainsi que le paramètre de viscosité. Les valeurs de ces quatre derniers paramètres ont été définis conformément à la documentation du logiciel ABAQUS, à savoir respectivement 0.1, 1.16, 0.66 et 0.0. L'angle de dilatation a été choisi à  $31^\circ$  (Vilanova et al., 2016). Les données concernant le comportement du matériau en compression ont été choisies en considérant la courbe contrainte-déformation du béton telle que définie par le modèle de Popovics (Popovics, 1973). La Figure 6-4 illustre cette courbe contrainte-déformation obtenue avec le modèle de Popovics. Le comportement du béton en tension a été considéré comme étant linéaire jusqu'à ce que la contrainte en tension atteigne la résistance ultime du béton en tension. La résistance ultime du béton en tension est définie

comme étant égale environ 10% de la résistance en compression, soit  $3 \text{ MPa}$ . Après la fissuration, le comportement du béton en tension est considéré comme étant plastique.

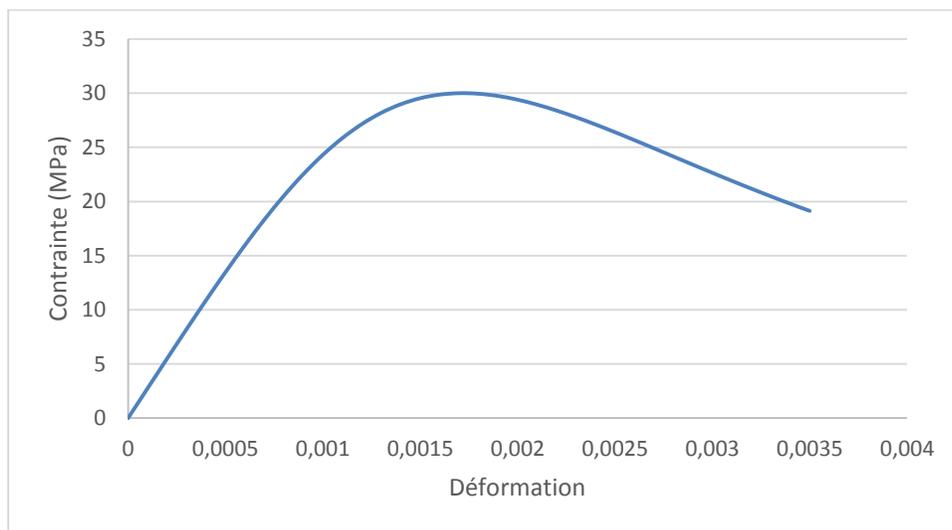
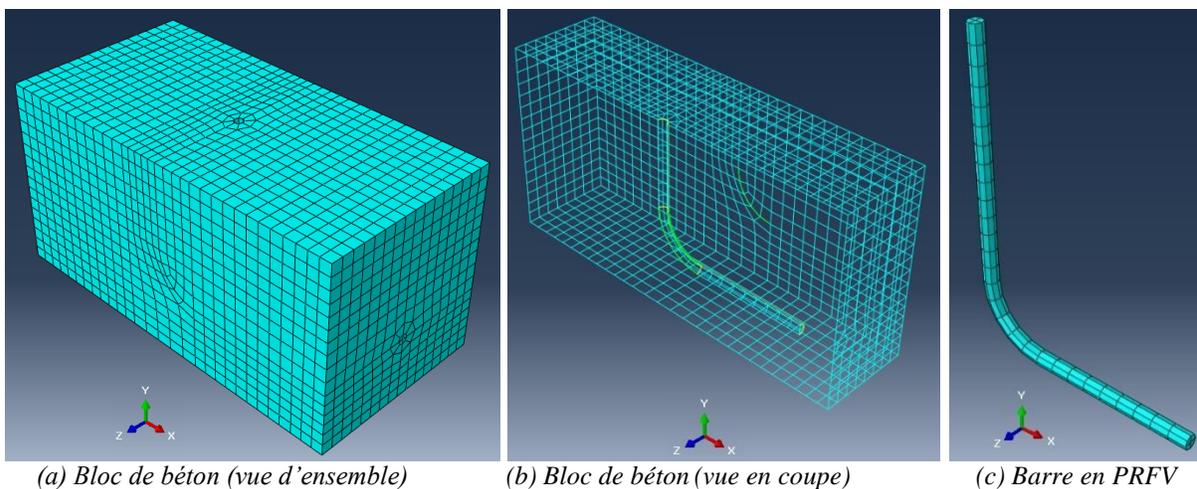


Figure 6-4 - Courbe contrainte-déformation du béton

#### 6.2.4 Maillage et types d'éléments

Les deux parties qui constituent le modèle, c'est-à-dire le bloc de béton et la barre en PRFV, sont modélisées avec des éléments solides en trois dimensions de type « brique linéaire à 8 nœuds » ( $C3D8R$ ). Ces éléments ont une taille approximative de 20 mm, ce qui permet de mailler le modèle suffisamment précisément sans pour autant utiliser un maillage trop fin qui nuirait à la convergence de la simulation. La Figure 6-5 présente le maillage du modèle :



(a) Bloc de béton (vue d'ensemble)

(b) Bloc de béton (vue en coupe)

(c) Barre en PRFV

Figure 6-5 - Maillage du modèle

## 6.2.5 Interface entre la barre en PRFV et le béton

La modélisation de l'interface entre la barre en PRFV et le béton est une problématique majeure, car c'est un paramètre qui est complexe à définir et qui influence grandement le modèle numérique. Afin de modéliser le plus précisément possible l'interface entre la barre et le béton, deux approches différentes ont été utilisées pour représenter d'une part le contact normal (c'est-à-dire la pression exercée par la barre sur le béton) et d'autre part le contact tangentiel (c'est-à-dire l'adhérence entre la barre et le béton).

Le contact normal entre la barre en PRFV et le béton a été modélisé à l'aide d'une interaction de contact qui associe les surfaces de la barre et du bloc de béton. Les propriétés de cette interaction de contact ont été définies par une relation exponentielle qui détermine la pression exercée par la barre sur le béton en fonction de l'écart entre les deux surfaces. Avec cette méthode, la pression de contact commence à s'exercer lorsque l'écart entre les surfaces, mesuré dans la direction normale, devient inférieur à  $c_0$  (Dehestani et al., 2017). La pression de contact augmente de manière exponentielle à mesure que l'écart entre les deux surfaces diminue, jusqu'à atteindre la pression  $p_0$  lorsque l'écart est nul. La Figure 6-6 illustre la relation exponentielle qui définit la pression de contact en fonction de l'écart entre les surfaces (© Dassault Systèmes, 2014).

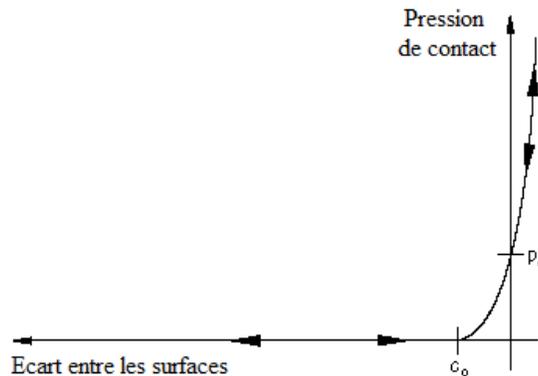


Figure 6-6 - Relation exponentielle entre la pression de contact et l'écart entre les surfaces

Les deux paramètres à préciser pour définir cette interfaçon de contact sont donc  $c_0$  et  $p_0$ . La valeur de  $c_0$  a été déterminée par essai-erreur. Cette valeur ne doit pas être trop faible pour ne pas compromettre la convergence de la simulation, mais ne doit pas être trop élevée non plus pour ne pas diminuer la précision du modèle. 0.1 est un bon compromis et c'est donc cette valeur qui a été retenue pour  $c_0$ . La valeur de  $p_0$  a été déterminée en considérant la répartition des contraintes dans la partie courbe de la barre. La Figure 6-7 illustre la distribution des contraintes

dans la partie courbe d'une barre en PRFV noyée dans un bloc de béton, en ignorant l'adhérence de la barre avec le béton :

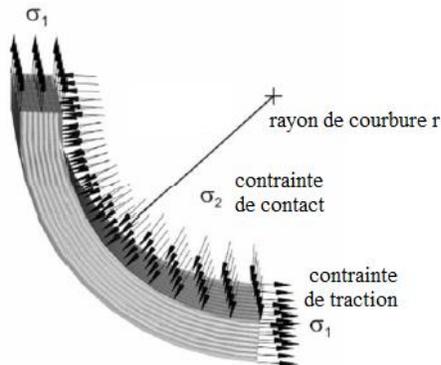


Figure 6-7 - Répartition des contraintes dans la partie courbe de la barre

En considérant que la pression exercée par le béton est uniforme le long de la barre et en négligeant l'adhérence de la barre avec le béton, l'équilibre des forces au sein de la barre permet d'établir l'équation 6.2 :

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 t}{r} \quad (6.2)$$

Avec :

$\sigma_2$  : la pression exercée par le béton sur la barre (en MPa) ;

$\sigma_1$  : la contrainte de tension dans la barre (en MPa) ;

$t$  : l'épaisseur de la barre (en mm), qui équivaut à  $\frac{\pi d}{4}$  dans le cas d'une barre circulaire ;

$r$  : le rayon de courbure de la barre (en mm).

En considérant la contrainte de tension moyenne à la rupture des barres #5 ( $d = 15 \text{ mm}$ ) de type B, à savoir  $\sigma_1 = 800 \text{ MPa}$ , on obtient une pression de contact environ égale à  $150 \text{ MPa}$ . C'est donc cette valeur qui a été choisie pour définir  $p_0$ .

Le contact tangentiel entre la barre en PRFV et le béton a été modélisé à l'aide d'éléments de type connecteur *CONN3D2*. En l'occurrence, ce sont des connecteurs axiaux en translation dont le comportement correspond à celui d'un ressort, comme l'illustre la Figure 6-8 (© Dassault Systèmes, 2014). Ces connecteurs permettent d'appliquer une force de rappel entre deux nœuds, cette force étant définie en fonction de la distance entre les nœuds. Les propriétés des connecteurs sont définies de manière à correspondre à la relation adhérence-glisement entre la barre en PRFV et le béton.

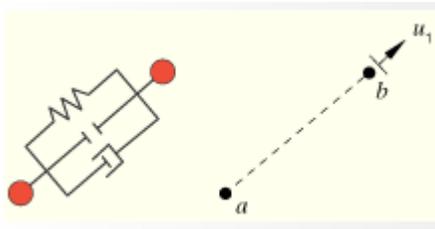


Figure 6-8 - Principe de fonctionnement des connecteurs axiaux en translation

La relation adhérence-glisement a été définie de deux façons différentes. Dans un premier temps, elle a été définie à l'aide de données expérimentales. Ces données sont le résultat d'essais d'arrachement menés avec des barres #5 de type C. Le comportement adhérence-glisement des barres de type B est supposé être comparable à celui des barres de type C car le revêtement de surface de ces deux types de barres est similaire. Les essais d'arrachement ont été conduits selon les spécifications de la méthode d'essai B.3 de l'ACI 440.3R. Par la suite, la relation adhérence-glisement a été définie à partir d'un modèle numérique. Parmi les différents modèles adhérence-glisement qui ont été développés, c'est le *BPE Modified Model* (Cosenza et al., 1997) qui a été choisi car c'est ce modèle qui représente le plus fidèlement l'interface entre une barre en PRF et le béton (Lin et Zhang, 2014). Les paramètres du *BPE Modified Model* ont été déterminés par essai-erreur, de sorte que la relation adhérence-glisement du modèle numérique corresponde aux résultats expérimentaux. La Figure 6-9 présente la courbe adhérence-glisement obtenue expérimentalement avec les essais d'arrachement et celle obtenue numériquement avec le *BPE Modified Model*.

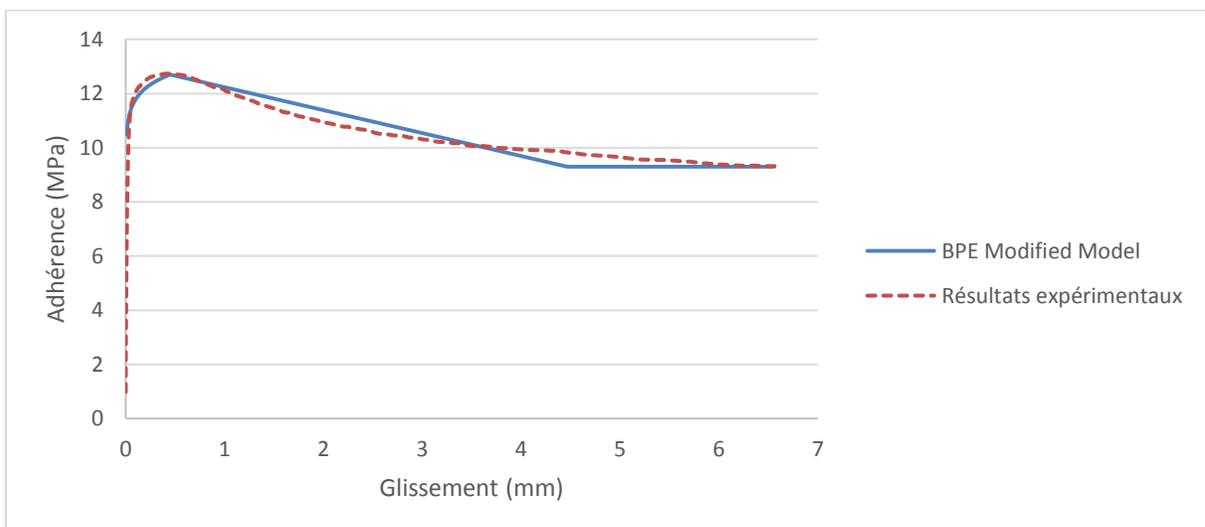


Figure 6-9 - Relations adhérence-glisement

Les éléments connecteurs ont été placés tous les 20 mm le long de la partie courbe et le long de la partie rectiligne ancrée dans le béton. La partie rectiligne de la barre qui est dé-liaisonnée de la barre ne comporte pas de connecteur mais est reliée au bloc de béton uniquement avec l'interaction de contact normal. La Figure 6-10 illustre la disposition des connecteurs axiaux dans le modèle. Les relations adhérence-glissement, qu'elles soient obtenues de manière expérimentale ou numérique, expriment la contrainte d'adhérence (en MPa) en fonction du glissement (en mm) entre la barre en PRFV et le béton. Or, les paramètres des éléments connecteurs permettent d'exprimer une force (en N) en fonction d'un déplacement (en mm). Par conséquent, la contrainte d'adhérence doit être répartie sur la surface d'influence de chaque connecteur afin de déterminer la force qui doit être appliquée dans le connecteur. L'Annexe C présente les paramètres qui ont été choisis pour définir le *BPE Modified Model* et explique comment a été calculée la force s'exerçant dans chacun des éléments connecteurs.

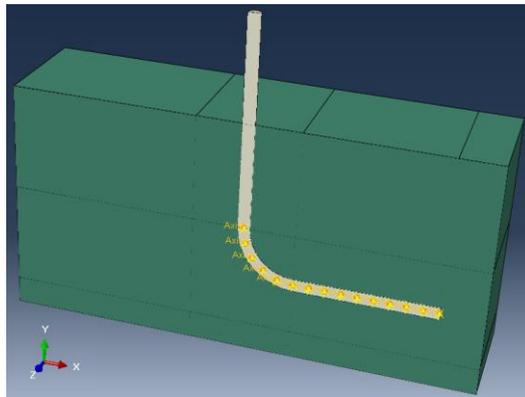


Figure 6-10 - Position des connecteurs (vue en coupe)

### 6.2.6 Paramètres d'analyse

La simulation a été exécutée avec ABAQUS/Standard. Cette fonction est utilisée pour déterminer les solutions de problèmes non linéaires quasi-statiques. Elle met en œuvre la méthode des éléments finis en exécutant des phases de calculs successives. Pour s'assurer de la convergence de l'analyse, chaque phase de calculs est extrapolée à partir de la phase précédente avec un incrément qui s'ajuste de manière automatique. Les incréments minimum et maximum sont fixés respectivement à 0.01 MPa et 5 MPa. A chaque étape de calculs, les équations sont résolues avec la méthode directe et l'algorithme de Newton. Les effets non linéaires des grands déplacements sont négligés. La méthode de stabilisation adaptative est utilisée afin d'améliorer la convergence des calculs.

## 6.3 Analyse des résultats

### 6.3.1 Influence du modèle d'interface entre la barre et le béton

Afin de valider le modèle d'interface entre la barre en PRFV et le béton, deux simulations différentes ont été exécutées : l'une avec la relation adhérence-glissement obtenue expérimentalement et l'autre avec la relation obtenue numériquement. En ce qui concerne la comparaison des contraintes et des déformations au sein du modèle, l'écart relatif des résultats entre les deux simulations est inférieur à 5%. Par conséquent, l'influence du modèle d'interface est négligeable. Par la suite, ce sont les résultats de la simulation utilisant la relation adhérence-glissement obtenue numériquement qui sont présentés, car c'est cette simulation qui fournit les résultats les plus semblables à ceux obtenus durant les essais mécaniques.

### 6.3.2 Relation force-déplacement

La Figure 6-11 représente la courbe force-déplacement obtenue à l'issue de la modélisation par éléments finis. Comme pour les mesures effectuées lors des essais mécaniques réels, le déplacement a été mesuré à l'extrémité de la partie rectiligne de la barre et la force correspond à l'effort de traction exercé sur la barre. Malheureusement, le déplacement n'a pas été mesuré lors des essais mécaniques des barres #5 de type B. La comparaison directe entre les résultats obtenus expérimentalement et numériquement est donc impossible. Néanmoins, l'allure de la courbe est cohérente par rapport au comportement élastique des barres en PRFV et le déplacement ultime est du même ordre de grandeur (environ 10 mm) que celui mesuré pour les barres #5 de type A et D et pour les barres #6 de type B.

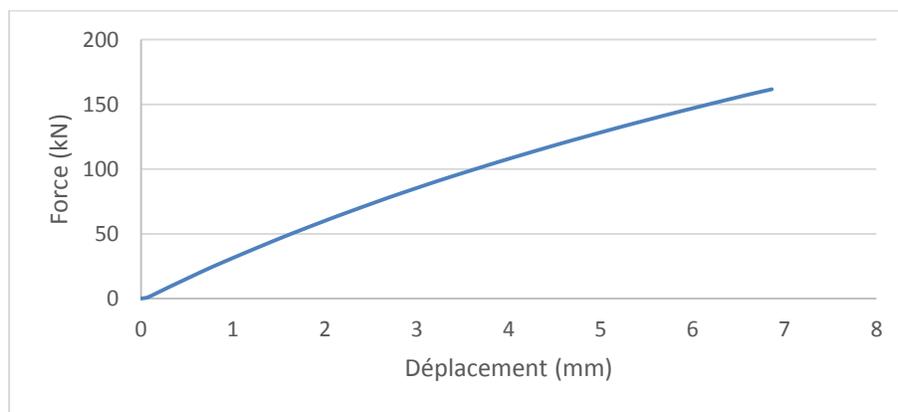


Figure 6-11 - Courbe force-déplacement (modélisation par éléments finis)

### 6.3.3 Répartition des contraintes

La Figure 6-12 illustre la répartition des contraintes dans la barre en PRFV obtenue avec la modélisation par éléments finis. Conformément avec ce qui a été observé durant les essais mécaniques avec la nouvelle méthode, les contraintes se concentrent dans la partie courbe près de la jonction avec la partie rectiligne. Bien que la modélisation ait été effectuée en tenant compte des propriétés des barres de type B, la distribution des contraintes obtenue avec le modèle peut également être étendue aux barres de types A, C et E. En effet, cette distribution particulière des contraintes explique le mode de rupture observé pour ces quatre types de barres (cf. 5.2.4).

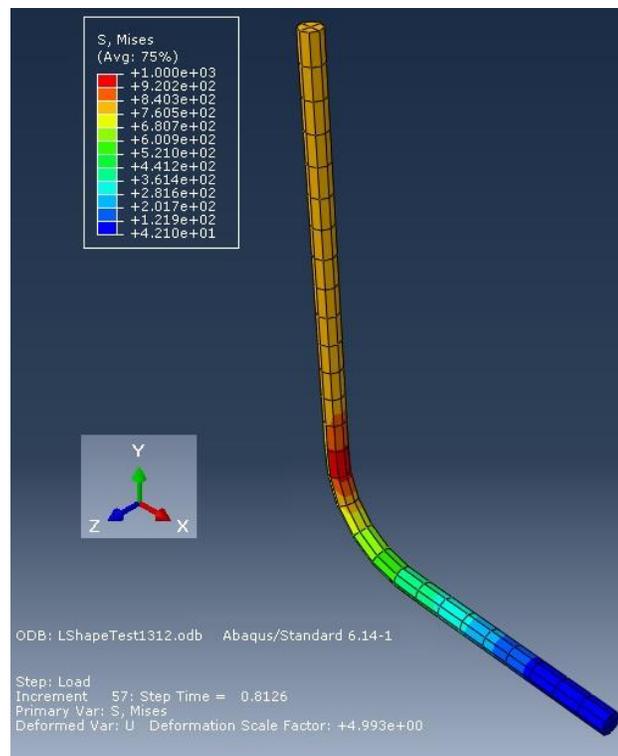


Figure 6-12 - Contraintes dans la barre en PRFV

La contrainte dans la barre dépasse la résistance ultime à la traction du PRFV (fixée à 1000 MPa pour le modèle) lorsque la charge de traction appliquée à la barre atteint environ 163 kN. En considérant la surface nominale d'une barre #5 (199 mm<sup>2</sup> d'après le Tableau 1 de la norme CSA S807-10), la résistance dans la partie courbe de la barre obtenue avec la modélisation vaut environ 821 MPa. Pour rappel, avec des paramètres identiques (barres #5 de type B avec une longueur d'ancrage  $l_d^* = 12d$  et les mêmes caractéristiques pour le bloc de béton), la résistance moyenne dans la partie courbe obtenue à l'issue des essais avec la nouvelle méthode est environ

801 MPa. En ce qui concerne la résistance dans la partie courbe, l'écart relatif entre les résultats numériques et expérimentaux est donc inférieur à 3%. La pertinence des paramètres choisis pour le modèle est donc justifiée.

La Figure 6-13 montre une vue en coupe du bloc de béton qui permet d'examiner la répartition des contraintes à l'intérieur du béton. Logiquement, les contraintes se concentrent à l'intérieur de la courbure de la barre, là où la pression exercée par la barre sur le béton est la plus forte. Dans cette zone, les contraintes excèdent la résistance à la compression du béton. Le béton est donc fissuré, écrasé sous la pression de la barre. Cependant, les dimensions du bloc de béton sont suffisamment importantes pour que le confinement du béton contienne cette fissuration locale. Par ailleurs, la région où est ancrée la partie rectiligne de la barre est également une zone de concentration de contraintes, mais dans une moindre mesure. Les contraintes de compression (respectivement de tension) dans cette zone restent inférieures à la résistance à la compression (respectivement à la tension) du béton, donc la longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$  est suffisante. Les résultats de la modélisation en termes de répartition des contraintes dans le béton permettent donc de valider les paramètres de la nouvelle méthode d'essai en ce qui concerne les dimensions du bloc de béton, les propriétés du béton et la longueur d'ancrage.

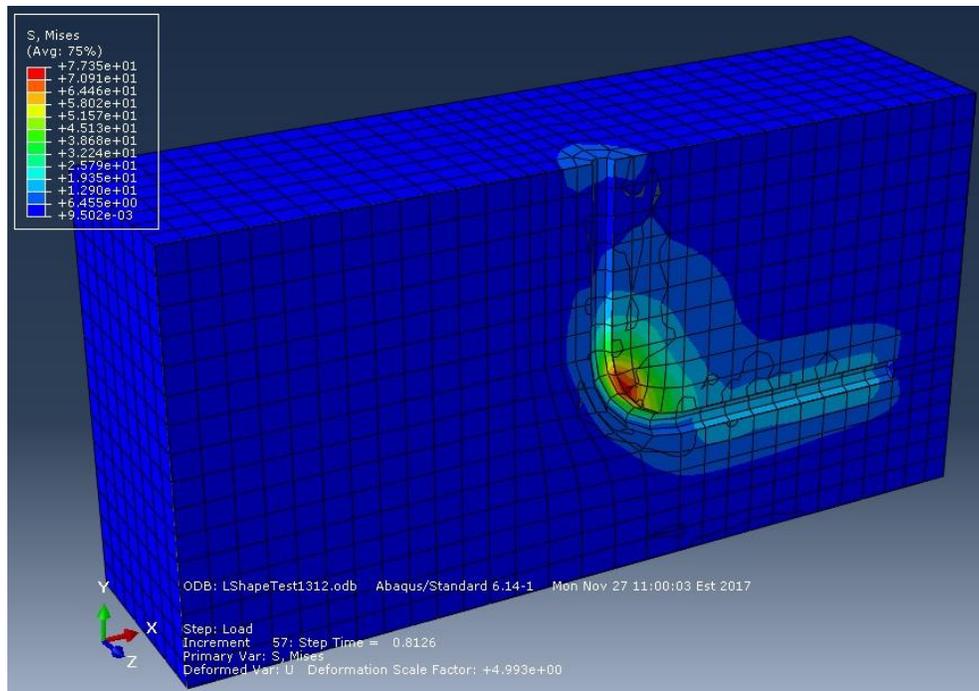


Figure 6-13 - Contraintes dans le bloc de béton

## 6.4 Bilan de l'étude numérique

- L'étude numérique a permis de modéliser par éléments finis le comportement d'un spécimen testé avec la nouvelle méthode d'essai. Le modèle reprend les caractéristiques d'un spécimen avec une barre #5 de type B, une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$  et un bloc de béton de dimensions  $300 \times 300 \times 600 \text{ mm}$ . Les propriétés mécaniques de la barre en PRFV et du béton ont été définies de manière réaliste. L'interface entre la barre et le béton a été modélisée en prenant en considération la relation adhérence-glisserment obtenue à l'aide d'essais d'arrachement ainsi qu'à partir d'un modèle numérique ;
- Le comportement force-déplacement obtenu à l'issue de la modélisation est cohérent par rapport aux résultats expérimentaux, même si ce constat devrait être confirmé en mesurant le déplacement lors d'essais mécaniques de barres #5 de type B ;
- La répartition des contraintes le long de la barre confirme l'interprétation du mode de rupture déduite des essais mécaniques : les contraintes se concentrent dans la partie courbe près de la jonction avec la partie rectiligne ;
- La résistance dans la partie courbe calculée avec la modélisation par éléments finis correspond à la résistance mesurée lors des essais mécaniques. Les paramètres du modèle sont donc validés ;
- Selon les résultats de la modélisation, le béton est fissuré localement sous la pression de la barre à l'intérieur de la partie courbe. Néanmoins, cette fissuration reste locale, ce qui prouve que les dimensions du bloc de béton et les propriétés mécaniques du béton choisies pour la nouvelle méthode d'essai sont suffisantes. De même, la longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$  est validée.

Finalement, l'étude numérique permet de comprendre plus en détail le comportement d'un spécimen testé avec la nouvelle méthode d'essai. La répartition des contraintes dans la barre en PRFV et dans le bloc de béton confirme l'interprétation du mode de rupture observé pour les barres de type A, B, C et E. Les résultats de la modélisation par éléments finis sont similaires aux résultats obtenus expérimentalement. Ainsi, les résultats de l'étude numérique permettent de valider les paramètres expérimentaux de la nouvelle méthode d'essai.

La définition des paramètres numériques pourrait toutefois être améliorée afin d'affiner la précision du modèle. Par exemple, il serait intéressant d'acquérir davantage de données

concernant les essais d'arrachement pour chaque type de barre, afin d'optimiser la modélisation de l'interface entre la barre en PRFV et le béton. De même, la définition des propriétés des matériaux pourrait s'appuyer sur des résultats expérimentaux plutôt que sur les données des fabricants pour le PRFV ou un modèle numérique pour le béton.

## CHAPITRE 7 CONCLUSION

Les barres d'armature en PRFV sont une alternative intéressante aux barres d'armature traditionnelles en acier, notamment en raison de leurs propriétés physiques plus durables. Néanmoins, un inconvénient important propre à ces matériaux concerne les procédés de fabrication des barres courbes, car la courbure diminue significativement la résistance en traction de la barre. Les codes et les normes (CSA S806-12 et ACI 440.3R-04) spécifient la méthode d'essai B.5 pour mesurer la résistance en traction dans la partie courbe des étriers en PRFV. Néanmoins, cette méthode d'essai reste difficile à mettre en place et est limitée en ce qui concerne la géométrie des barres qui peuvent être testées. De plus, la configuration du dispositif expérimental de la méthode B.5 n'est pas optimale et peut compromettre la fiabilité des résultats. Il est donc nécessaire de développer une nouvelle méthode d'essai pour mesurer la résistance en traction dans la partie courbe des barres en PRFV de manière pratique et fiable.

L'examen des recherches antérieures sur la résistance des barres courbes en PRF suggère des dispositifs expérimentaux qui peuvent être améliorés pour concevoir la nouvelle méthode d'essai. Cependant, ces dispositifs expérimentaux doivent être optimisés afin de s'adapter à l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des barres en PRF. Dans le cadre de ce projet, un programme expérimental a donc été mis en œuvre dans un premier temps afin d'évaluer les propriétés physiques de barres courbes en PRFV. Les barres testées ont été fournies par cinq fabricants différents qui utilisent des procédés de fabrication relativement différents. Les essais physiques ont permis de démontrer que les propriétés physiques dans la partie courbe des barres en PRFV sont similaires à celle dans la partie rectiligne. Ces essais ont également été l'occasion de s'assurer de la conformité des matériaux par rapport aux spécifications de la norme CSA S807-10. Toutes les barres testées se sont révélées conformes, excepté les barres de type E qui présentent un défaut de fabrication.

Une fois les propriétés physiques des barres en PRFV établies, un programme expérimental a été conduit dans un deuxième temps afin de développer la nouvelle méthode d'essai. De nombreux spécimens ont été testés avec des configurations variées, dans le but de déterminer la configuration de la méthode d'essai qui permet d'obtenir les résultats les plus pertinents. Les résultats obtenus avec la nouvelle méthode d'essai ont également été comparés avec ceux obtenus avec la méthode d'essai B.5 pour s'assurer que les deux méthodes fournissent des

résultats équivalents. Les spécimens qui ont été développés pour la nouvelle méthode d'essai comportent une seule barre en PRFV en forme de L, qui est ancrée dans un bloc monolithique de béton. Le dispositif expérimental est constitué d'un vérin hydraulique qui applique une charge de traction sur la barre en PRF, ainsi qu'une cellule de charge qui mesure la force appliquée. À l'issue des essais mécaniques, il s'est avéré que le type de barre influençait le mode de rupture et la résistance dans la partie courbe. Les résultats obtenus lors des différentes phases d'essais ont toutefois permis de valider les principaux paramètres de la nouvelle méthode d'essai. Ainsi, quel que soit le type de barre, un bloc de béton  $300 \times 300 \times 600$  mm sans renforcement avec une longueur d'ancrage  $l_a^* = 12d$  et un taux de chargement de 250 MPa/min conviennent pour les barres #5 et #6.

Finalement, une étude numérique a été conduite afin de comprendre plus en détail le comportement d'un spécimen testé avec la nouvelle méthode d'essai. La modélisation par éléments finis a permis d'examiner la répartition des contraintes au sein de la barre en PRFV et du bloc de béton. Les résultats obtenus avec le modèle par éléments finis sont similaires à ceux obtenus expérimentalement. Les résultats de l'étude numérique ont permis de valider les paramètres expérimentaux de la nouvelle méthode d'essai.

A l'issue de ce projet, les travaux qui ont été menés ont donc permis de développer un nouveau protocole d'essais de caractérisation mécanique des barres d'armature courbes en PRF. Les recherches doivent toutefois se poursuivre afin d'optimiser les paramètres de la nouvelle méthode d'essai, notamment en ce qui concerne les barres de diamètre supérieur à 20 mm. Par ailleurs, le modèle numérique pourrait être amélioré en définissant les paramètres concernant les propriétés des matériaux et l'interface entre la barre en PRFV et le béton à partir de résultats expérimentaux. De plus, le modèle par éléments finis peut être modifié afin d'étudier l'influence d'autres paramètres pour le protocole de la nouvelle méthode d'essai, notamment en changeant la géométrie de la barre ou du bloc de béton, ou bien en modifiant les propriétés des matériaux.

# ANNEXE A

# PROGRAMME EXPERIMENTAL

Tableau A.0.1 - Programme expérimental

Nombre de spécimens	Type de barre	Diamètre	Type de béton	Taux de chargement (MPa/min)	Dimensions bloc de béton (mm)	Enrobage (mm)	Longueur d'ancrage $l_d^*$	Bloc de béton renforcé	Exposition solution alcaline
4	A	#5	Essais standards avec la méthode B5 définie par les normes CSA S806-12 et ACI 440.3R-04						
4	B	#5							
4	C	#5							
4	D	#5							
4	E	#5							
5	A	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
5	B	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
5	C	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
5	D	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
5	E	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
3	B	#6	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
3	B	#6	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db	X	
3	B	#6	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
3	B	#6	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db	X	
2	B	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	3 db		
2	B	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	6 db		
2	B	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	10 db		
2	B	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	15 db		
2	D	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	3 db		
2	D	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	6 db		
2	D	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	10 db		
2	D	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	15 db		
3	B	#4	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
3	D	#4	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
5	C	#3	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
5	C	#8	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		
3	B	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		X
3	D	#5	mélange normal	250	300x300x600	50	12 db		X
3	B	#5	mélange normal	500	300x300x600	50	12 db		
3	B	#5	mélange normal	125	300x300x600	50	12 db		
3	B	#5	mélange normal	62.5	300x300x600	50	12 db		
3	B	#5	prise rapide	250	300x300x600	50	12 db		
3	B	#6	prise rapide	250	300x300x600	50	12 db		
3	B	#5	mélange normal	250	300x300x400	50	12 db		
3	D	#5	mélange normal	250	300x300x600	100	12 db		

# ANNEXE B COMPOSITION DES BÉTONS

## B.1 Béton normal

La résistance en compression à 28 jours du béton normal utilisé a varié de 32 à 38 MPa. La composition du béton est montrée dans le Tableau B.1.

Tableau B.1 – Composition du béton normal

Composante	Quantité
$f'_c$ (MPa)	35
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	350
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	813
Granulats (kg/m <sup>3</sup> )	1032
Affaissement (mm)	100-150
Contenu en air (%)	5-6
Poids unitaire (Kg/m <sup>3</sup> )	2400
Rapport eau/ciment	0.44
Grosseur maxi du granulat (mm)	14
Fumée de silice	8% (Gu/Gub-SF)

## B.2 Béton à prise rapide

Un béton à prise rapide prêt à l'emploi de Sika Canada (Sikacrete-08 SCC), produit approuvé par leMTMDET, a été utilisé dans le cadre de ce projet de recherche. La composition est montrée dans le Tableau B.2.

Tableau B.2 – Composition du béton à prise rapide

Composante	Specification / Quantity
$f'_c$ à 28 jours (MPa)	45
$f'_c$ à 3 jours (MPa)	31
Affaissement (mm)	600-700
Contenu en air (%)	5-9
Poids unitaire (Kg/m <sup>3</sup> )	2400

Le contenu de dix sacs de Sikacrete-08 SCC a été mélangé avec 25 litres d'eau pendant 2 minutes. Ensuite 2 litres d'eau ont été ajoutés et procéder au mélange pour un temps additionnel de 1 minute. La résistance en compression obtenu après 72 heures sur 15 cylindres s'élève à 43±2 MPa.

# ANNEXE C INTERFACE BARRE-BÉTON

## C.1 Relation adhérence-glisement avec le *BPE Modified Model*

L'Equation B.1 et la Figure B.0-1 définissent la relation adhérence-glisement du *BPE Modified Model* (Cosenza et al., 1997) :

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha \quad \text{si } 0 \leq s \leq s_1 \quad (\text{B.1a})$$

$$\frac{\tau}{\tau_1} = 1 - p \left(\frac{s}{s_1} - 1\right) \quad \text{si } s_1 \leq s \leq s_3 \quad (\text{B.1b})$$

$$\tau = \tau_3 \quad \text{si } s_3 \leq s \quad (\text{B.1c})$$

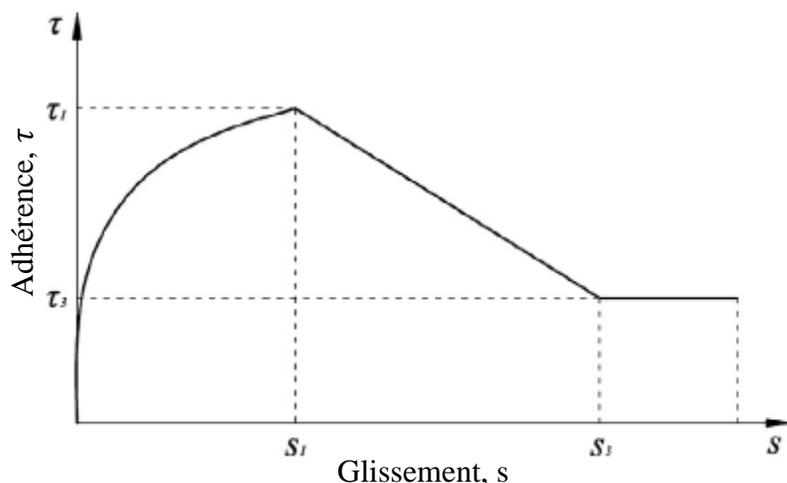


Figure B.0-1 - *BPE Modified Model*

Le Tableau B.1 présente les paramètres du *BPE Modified Model* qui ont été choisis pour définir la relation adhérence-glisement du modèle numérique. Ces paramètres ont été déterminés par essai-erreur, de manière à ce que la relation adhérence-glisement obtenue avec le *BPE Modified Model* soit similaire à celle obtenue à l'issue des essais d'arrachement des barres #5 de type C.

Tableau B.1 - Paramètres du *BPE Modified Model*

$\alpha$	$p$	$s_1$	$\tau_1$	$\tau_3$	$s_3$
0.05	0.03	0.45	12.7	9.3	4.47

## C.2 Distribution de la relation adhérence-glissement

La Figure B.0-2 illustre la répartition des éléments connecteurs le long de la barre en PRFV. Les connecteurs sont espacés environ tous les 20 mm. Les zones hachurées représentent les surfaces d'influence de chaque connecteur.

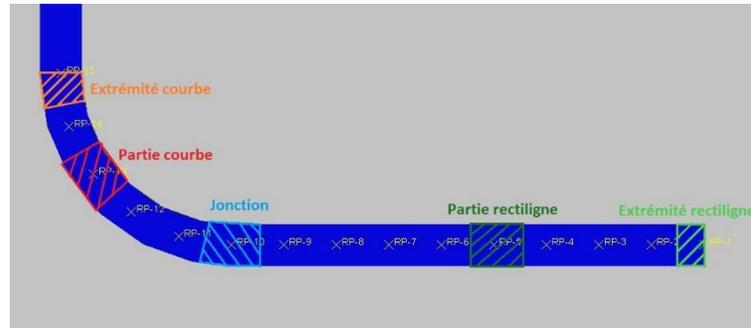


Figure B.0-2 - Répartition des connecteurs

Le Tableau B.2 donne l'aire des surfaces d'influence pour chaque zone de connecteur. La force qui s'applique dans chaque élément connecteur (en kN) est calculée en multipliant la contrainte d'adhérence (obtenue avec la relation adhérence-glissement et exprimée en MPa) par la surface d'influence associée au connecteur (en mm<sup>2</sup>).

Tableau B.2 - Surface d'influence des connecteurs

Extrémité courbe	Partie courbe	Jonction	Partie rectiligne	Extrémité rectiligne
513.2 mm <sup>2</sup>	1026.4 mm <sup>2</sup>	1015.9 mm <sup>2</sup>	1005.3 mm <sup>2</sup>	502.7 mm <sup>2</sup>

## REFERENCES

- © Dassault Systèmes. (2014). ABAQUS Analysis User's Guide.
- Achillides, Z. et Pilakoutas, K. (2004). Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. *Journal of Composites for construction*, 8(2), 173–181.
- Ahmed, E. A., El-Sayed, A. K., El-Salakawy, E. et Benmokrane, B. (2010). Bend Strength of FRP Stirrups: Comparison and Evaluation of Testing Methods. *Journal of Composites for Construction*, 14(1), 3– 10. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000050
- Alkhrdaji, T., Fyfe, E. R., Karbhari, V. M., Schupack, M., Bakis, C. E., Ganjehlou, A., ... others. (2004). Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures.
- ASTM D696-16, Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between  $-30^{\circ}\text{C}$  and  $30^{\circ}\text{C}$  with a Vitreous Silica Dilatometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D2584-11, Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D2734-16, Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D3418-15, Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D5117-09, Standard Test Method for Dye Penetration of Solid Fiberglass Reinforced Pultruded Stock, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM D7914 / D7914M-14, Standard Test Method for Strength of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bent Bars in Bend Locations, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM E831-14, Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM E1131-08(2014), Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM E1356-08(2014), Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- ASTM E1640-13 (2013), Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by Dynamic Mechanical Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- Benmokrane, B., Nazair, C., Seynave, X., and Manalo, A. (2017). Comparison between ASTM D7205 and CSA S806 Tensile-Testing Methods for Glass-Fiber-Reinforced Polymer (GFRP)

- Bars. *Journal of Composites for Construction*, ASCE 21(5), 04017038-1.
- Cosenza, E., Manfredi, G. et Realfonzo, R. (1997). Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. *Journal of composites for construction*, 1(2), 40–51.
- Dehestani, M., Asadi, A. et Mousavi, S. S. (2017). On discrete element method for rebar-concrete interaction. *Construction and Building Materials*, 151, 220- 227. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.086
- Groupe CSA. (2012). *Règles de calcul et de construction des structures de bâtiment contenant des polymères renforcées de fibres*.
- Imjai, T., Guadagnini, M. et Pilakoutas, K. (2007). Mechanical performance of curved FRP rebars-Part I: Experimental study. Dans *Asia-Pacific Conference on FRP in Structures* (p. 333–338). International Institute for FRP in Construction, Kingston, ON, Canada.
- Ishihara, K., Obara, T., Sato, Y., Ueda, T. et Kakuta, Y. (1997). *Evaluation of ultimate strength of FRP rods at bent-up portion* (vol. 2).
- Lin, X. et Zhang, Y. X. (2014). Evaluation of bond stress-slip models for FRP reinforcing bars in concrete. *Composite Structures*, 107, 131- 141. doi:10.1016/j.compstruct.2013.07.037
- M. R. Ehsani, H. S., and S. Tao. (1995). Bond of Hooked GFRP Rebars to Concrete. *Materials Journal*, 92(4). doi:10.14359/974
- Maruyama, T., Honma, M. et Okamura, H. (1993). Experimental study on tensile strength of bent portion of FRP rods. *ACI special publications: Fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures, SP-138*, 163- 176.
- Morphy, R. D. (1999). Behaviour of fibre-reinforced polymer (FRP) stirrups as shear reinforcement for concrete structures.
- Obaidat, Y. T. (2011). *Structural retrofitting of concrete beams using FRP: debonding issues*. Department of Construction Sciences, Structural Mechanics, Lund University, Lund.
- Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curves of concrete. *Cement and Concrete Research*, 3(5), 583- 599.
- Shehata, E., Morphy, R. et Rizkalla, S. (2000). Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(5), 859–872.
- Vilanova, I., Torres, L., Baena, M. et Llorens, M. (2016). Numerical simulation of bond-slip interface and tension stiffening in GFRP RC tensile elements. *Composite Structures*, 153, 504- 513. doi:10.1016/j.compstruct.2016.06.048
- Vint, L. (2012). *Investigation of bond properties of glass fibre reinforced polymer (GFRP) bars in concrete under direct tension*.