



Faculté de génie
Département de génie civil

**ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE ET THÉORIQUE DU COMPORTEMENT
À LA FLEXION DE NOUVEAUX POTEAUX EN MATÉRIAUX COMPOSITES**

Thèse de doctorat en génie civil

Slimane METICHE

Sherbrooke (Québec), Canada

mars 2008

RÉSUMÉ

La demande croissante en poteaux pour les différents réseaux d'électricité et de télécommunications a rendu nécessaire l'utilisation de matériaux innovants, qui préservent l'environnement. La majorité des poteaux électriques existants au Canada ainsi qu'à travers le monde, sont fabriqués à partir de matériaux traditionnels tel que le bois, le béton ou l'acier. Les motivations des industriels et des chercheurs à penser à d'autres solutions sont diverses, citons entre autre : La limitation en longueur des poteaux en bois ainsi que la vulnérabilité des poteaux fabriqués en béton ou en acier aux agressions climatiques. Les nouveaux poteaux en matériaux composites se présentent comme de bons candidats à cet effet, cependant ; leur comportement structural n'est pas connu et des études théoriques et expérimentales approfondies sont nécessaires avant leur mise en marché à grande échelle.

Un programme de recherche intensif comportant plusieurs projets expérimentaux, analytiques et numériques est en cours à l'Université de Sherbrooke afin d'évaluer le comportement à court et à long termes de ces nouveaux poteaux en Polymères Renforcés de Fibres (PRF).

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente thèse, et notre recherche vise à évaluer le comportement à la flexion de nouveaux poteaux tubulaires coniques fabriqués en matériaux composites par enroulement filamentaire et ce, à travers une étude théorique, ainsi qu'à travers une série d'essais de flexion en "grandeur réelle" afin de comprendre le comportement structural de ces poteaux, d'optimiser la conception et de proposer une procédure de dimensionnement pour les utilisateurs.

Les poteaux en Polymères Renforcés de Fibres (PRF) étudiés dans cette thèse sont fabriqués avec une résine époxyde renforcée de fibres de verre type E. Chaque type poteaux est constitué principalement de trois zones où les propriétés géométriques (épaisseur, diamètre) et les propriétés mécaniques sont différentes d'une zone à l'autre. La différence entre ces propriétés est due au nombre de couches utilisées dans chaque zone ainsi qu'à l'orientation des fibres de chaque couche. Un total de vingt-trois prototypes de dimensions différentes; ont été testés en flexion jusqu'à la rupture. Deux types de fibres de verre de masses linéaires différentes, ont été utilisées afin d'évaluer l'effet du type de fibres sur le comportement à la flexion.

Un nouveau montage expérimental permettant de tester tous les types de poteaux en PRF a été dimensionné et fabriqué selon les recommandations décrites dans les normes ASTM D 4923-01 et ANSI C 136.20-2005.

Un modèle analytique basé sur la théorie des poutres en élasticité linéaire est proposé dans cette thèse. Ce modèle prédit avec une bonne précision le comportement expérimental charge – déflexion ainsi que la déflexion maximale au sommet des poteaux en PRF; constitués de plusieurs zones de caractéristiques géométriques et mécaniques différentes.

Une procédure de dimensionnement des poteaux en PRF, basée sur les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de la présente thèse, est également proposée.

Les résultats obtenus dans le cadre de la présente thèse permettront le développement et l'amélioration des règles de conception utiles et pratiques à l'usage des concepteurs et des industriels du domaine des poteaux en PRF. Les retombées de cette recherche sont à la fois économiques et technologiques, car les résultats obtenus constitueront une banque de données qui contribueront au développement des normes de calcul, et par conséquent à l'optimisation des matériaux utilisés, et serviront à valider de futurs résultats et modèles théoriques.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ici toute ma gratitude à mon directeur de recherches ; le Docteur Radhouane Masmoudi, qui m'a enseigné, encadré et guidé dans ce travail, conseillé et encouragé sans jamais ménager ses efforts tant intellectuels que morales. Son soutien était permanent ; qu'il trouve ici mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance.

Je tiens aussi à adresser mes sincères remerciements :

- ✚ Aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail de recherche.
- ✚ À tous les membres du groupe de recherche sur les structures et matériaux composites.
- ✚ Aux techniciens M. François Ntacorigira, M. Simon Sindayigaya et M. Nicolas Simard, pour leur aide ainsi qu'à tous les techniciens du département de génie civil qui ont participé dans ce travail.
- ✚ À Monsieur Marc Fillion, ancien technicien au service de mécanique spécialisée qui a apporté une valeureuse contribution à la conception et à la mise au point de l'appareillage pour l'essai de flexion sur les poteaux en matériau composite, qui n'a pas hésité à mettre son savoir et son expérience au service de la science et du développement de la recherche.
- ✚ À Monsieur Jaques Lacoste, Directeur technique d'InterTechnology pour sa précieuse assistance technique dans les instruments de laboratoire.
- ✚ À Monsieur Patrice cousin, chimiste au département de génie civil pour son aide dans l'étude microstructurale du matériau.
- ✚ Au fabricant des poteaux en matériaux composites pour la fourniture des prototypes, FRE Composites Inc., (St-André d'Argenteuil, Canada).

- ✚ Aux stagiaires Sarah Orban et Tommy Boisvert.

- ✚ À monsieur Claude Lupien, professeur et ancien directeur du département de génie civil.

- ✚ À tous mes collègues du département de génie civil.

- ✚ À tous le personnel du département de génie civil et de la faculté de génie.

- ✚ Au Conseil National de Recherche du Canada en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG), à Hydro – Québec Distribution et à la Fondation Canadienne pour l’Innovation (FCI) pour leurs appuis financiers qui ont permis la réalisation de ce projet.

- ✚ À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, afin que ce travail soit réalisé.

Enfin, Je ne saurais trop remercier les membres de ma famille pour leurs encouragements et leur patience durant toute la période de préparation de cette thèse.

À ma mère,

À la mémoire de mon père,

À mes frères et sœurs,

À mon épouse et âme sœur,

À mon bébé,

À toute ma famille,

À tous ceux et celles que j'aime et qui m'aiment,

Je dédie ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
1.1. Généralités	1
1.2. Historique du développement des poteaux en PRF	2
1.3. État du problème.....	2
1.4. Objectifs de la recherche.....	4
1.5. Originalité du projet et son apport	5
1.6. Organisation de la thèse.....	6
2. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	7
2.1. Aspects théoriques	7
2.1.1. Principes fondamentaux sur les Polymères Renforcés de Fibres (PRF).....	7
2.1.2. Procédés de fabrication appropriés aux poteaux en PRF.....	16
2.1.3. Méthodes de calcul des charges de vent sur les poteaux	17
2.1.4. Méthode d'évaluation de l'état de déformation dans un point	25
2.2. Revue de la littérature	28
3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL.....	35
3.1. Évaluation des propriétés mécaniques du matériau.....	35
3.1.1. Détermination du taux des constituants et de la séquence d'empilement par l'essai de pyrolyse.....	35
3.1.2. Détermination de la proportion de chaque couche par analyse au microscope électronique à balayage.....	39
3.2. Essais de flexion en grandeur réelle	42
3.2.1. Présentation et description des prototypes.....	42
3.2.2. Appareillage.....	47
3.2.3. Instrumentations	49
4. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....	54
4.1. Évaluation des propriétés mécaniques du matériau.....	54
4.1.1. Propriétés mécaniques d'une couche unidirectionnelle et taux des constituants.	54

4.1.2.	Propriétés mécaniques des laminés constituant les poteaux et séquences d'empilement.....	54
4.1.3.	Conclusions.....	87
4.2.	Comportement charge – déflexion.....	90
4.2.1.	Résistance à la flexion et modes de rupture.....	90
4.2.2.	Comportement charge - déflexion	102
4.2.3.	Conclusions.....	112
4.3.	Comportement charge – déformation	115
4.3.1.	Introduction.....	115
4.3.2.	Poteaux 17-B-3-C et 17-A-3-C.....	115
4.3.3.	Poteaux 18-B-3-C et 18-B-3-T	132
4.3.4.	Poteaux 20-B-4-C	152
4.3.5.	Poteaux 33-B-5-C et 35-B-5-C.....	162
4.3.6.	Poteaux 40-B-5-C-(1) et 40-B-5-T-(1).....	171
4.3.7.	Poteaux 40-A-5-C.....	176
4.3.8.	Poteau 29-B-5-0-(1).....	183
4.3.9.	Déformations maximales à la rupture.....	183
4.3.10.	Concentration des contraintes.....	185
4.3.11.	Conclusions.....	187
4.4.	Comportement charge – ovalisation	190
4.4.1.	Introduction.....	190
4.4.2.	Évaluation du comportement charge – ovalisation.....	190
4.4.3.	Conclusions.....	195
5.	PRÉDICTION THÉORIQUE DE LA DÉFLEXION DES POTEAUX EN PRF ..	196
5.1.	Modèle théorique	196
5.2.	Propriétés du matériau	199
5.3.	Comparaison avec les résultats expérimentaux	200
5.4.	Conclusions.....	204
6.	PROCÉDURE DE DIMENSIONNEMENT DES POTEAUX EN PRF	206
6.1.	Introduction.....	206

6.2.	Hypothèses de dimensionnement	206
6.3.	Combinaisons de charges	206
6.4.	Facteurs de sécurité pour les différentes propriétés mécaniques des PRF	207
6.5.	Résistance minimale à la flexion	208
6.6.	Déflexion maximale.....	208
6.7.	Contraintes admissibles et contraintes appliquées.....	208
6.7.1.	Contrainte de compression – Flambage local.....	209
6.7.2.	Contrainte de compression – Flambage flexionnel	210
6.7.3.	Contrainte de flexion	211
6.7.4.	Contrainte de traction	213
6.7.5.	Contrainte de cisaillement	213
6.8.	Contraintes admissibles pour des états de sollicitations multiples	215
6.8.1.	Contraintes en flexion et en compression.....	215
6.8.2.	Contraintes en flexion et en traction.....	216
6.8.3.	Contraintes en flexion, compression et cisaillement	217
6.9.	Vérification de la conception actuelle des poteaux en PRF testés dans le cadre de cette thèse.....	217
6.9.1.	Évaluation de la charge et du moment de flexion induits par le vent.....	222
6.9.2.	Vérification du moment de flexion maximum et de la déflexion maximale	223
6.9.3.	Vérification des contraintes	227
6.10.	Dimensionnement des poteaux en PRF	235
6.11.	Conclusions.....	246
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		248
BIBLIOGRAPHIE		255
ANNEXES		260
	Annexe A : Épaisseur de la paroi des poteaux.	261
	Annexe B : Schémas détaillés du montage expérimental pour l’essai de flexion sur les poteaux en PRF.....	262
	Annexe C: Articles publiés.....	271