

Résistance au glissement des assemblages métallisés et métallisés-galvanisés dans des ponts en acier

A. Chiza¹, C. D. Annan¹, A. M. Fafard¹, E. Levesque², C. Bernier²

¹ Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Québec, Québec, Canada.

² Structural-Ponts, une division de Groupe CANAM, Québec.

Résumé

Les assemblages boulonnés doivent être conçus en tant qu'assemblages de type antiglissement s'ils sont soumis à des charges variables, à des vibrations ou à un phénomène de fatigue. Ces situations sont fréquentes dans la construction des ponts en acier. Le fini de surfaces de contact des pièces en acier à assembler contrôle le niveau de résistance au glissement des assemblages. Les normes de conception, telle que le code canadien sur le calcul des ponts routiers CAN/CSA S6-06, spécifient les conditions de surfaces de contact désirées pour la conception. Actuellement, ces normes ne spécifient pas la résistance au glissement pour des surfaces de contact qui sont métallisées ou pour les surfaces combinées métallisées-galvanisées, alors que les éléments de la charpente d'acier sont couramment métallisés ou galvanisés pour assurer leur durabilité. Les fabricants de ponts sont donc obligés de masquer les surfaces de contact des assemblages avant d'appliquer les revêtements de protection sur les éléments structuraux, ce qui augmente considérablement les coûts et le temps de fabrication. Dans cette recherche, les résistances au glissement des assemblages de type antiglissement ayant des surfaces complètement métallisées ainsi que des surfaces combinées (métallisées-galvanisées), ont été caractérisées afin de proposer des modifications aux normes canadiennes. Les coefficients de frottement moyens sont obtenus en effectuant des tests en compression sur les échantillons avec différentes épaisseurs de métallisation ainsi qu'une force de serrage variée.

Mots clés: assemblages boulonnés antiglissement, galvanisation à chaud, métallisation, normes de conception, ponts en acier, résistance au glissement.

1.0 Introduction

Le glissement dans les assemblages est un aspect très important dans la construction des ponts en acier, car ceux-ci sont soumis au phénomène de fatigue ainsi qu'aux changements importants de la direction de chargement. La performance des assemblages de type antiglissement dépend grandement de la friction entre les surfaces de contact qui est développée par la force de serrage appliquée à l'aide des boulons à haute résistance. La condition de la surface est donc critique pour assurer une bonne performance. Les règles de conception des assemblages boulonnés de type antiglissement dans le code canadien sur le calcul des ponts routiers CAN/CSA S6-06, spécifient des conditions de surfaces de contact pour satisfaire les exigences de conception.

Pour préserver l'intégrité structurale des ponts en acier, les éléments exposés de la charpente doivent être protégés contre les conditions environnementales sévères. À cette fin, la métallisation (Gerdeman et Hecht, 1972) et la galvanisation (Birkemoe et Herrschaft, 1970) de la surface d'acier sont des solutions efficaces et durables. Il existe aussi des situations pratiques dans lesquelles les éléments principaux, tels les poutres principales d'acier métallisées, doivent

être connectés à des éléments secondaires, tels des entretoises galvanisées. Les règles de conception, CAN/CSA S6-06, ne spécifient pas la résistance au glissement pour les surfaces de contact qui sont métallisées ou pour les surfaces combinées métallisées-galvanisées. Les fabricants de ponts sont donc obligés de masquer les surfaces de contact des assemblages avant d'appliquer les revêtements de protection sur les éléments structuraux, ce qui augmente énormément les coûts et temps de fabrication

Dans cette recherche, les résistances au glissement des assemblages de type antiglissement ayant des surfaces complètement métallisées ainsi que des surfaces combinées métallisées-galvanisées, ont été caractérisées afin de proposer des modifications au code canadien CAN/CSA S6-06. Cet article résume les résultats des travaux expérimentaux, plus précisément des essais en compression à court terme, réalisés à l'Université Laval, qui ont été soutenus par Strucal-Ponts, une division de Groupe Canam.

2.0 Programme expérimental

2.1 Généralité

Le travail expérimental a inclus un total de 45 spécimens, dont 19 spécimens pour les essais sur les surfaces métallisées, 20 sur les surfaces combinées (métallisées-galvanisées) ainsi que 6 pour les surfaces de contact sans revêtement. L'élaboration du programme expérimental a été guidée par l'annexe A de Research Council on Structural Connections Specifications for Structural Joints using ASTM A325 or A490 Bolts (RCSC 2009). Une procédure et une technique unique ont été développées pour l'assemblage des échantillons ainsi que pour le suivi de la force de serrage transmise par les boulons. Le tableau 1 présente les paramètres qui ont été étudiés dans cette recherche.

2.2 Caractéristique des échantillons fabriqués

Les échantillons ont été fabriqués avec des plaques d'acier usinées à partir d'une plaque d'acier 350AT cat.3 de 5/8 po. d'épaisseur. Toutes les dimensions des échantillons étaient en conformité avec les spécifications de RCSC (2009). La force de serrage a été appliquée à l'aide d'un boulon A325 de 7/8 po. de diamètre, instrumenté d'une cellule de chargement. Le diamètre du trou de boulon de 15/16 po. a permis d'avoir un espacement suffisant pour que le glissement relatif entre les plaques puisse se produire. Les surfaces métallisées sont obtenues par une projection thermique de zinc à l'aide d'un pistolet à l'arc électrique. Le substrat d'acier est préparé en respectant les spécifications de Society for Protective Coatings SSPC-SP5 (grenailage à blanc). Pour ce qui est des surfaces galvanisées, le revêtement a été appliqué conformément à la spécification de la norme sur la galvanisation à chaud, qui a été approuvée par American Society for Testing and Materials (ASTM) en 2011, connue sous le nom ASTM A123 (AASHTO M111-11).

Chaque échantillon a été identifié selon les variables montrées dans le tableau 1. Par exemple, l'échantillon M-6m-70%-S fait référence à un test effectué sur un échantillon avec une couche de métallisation (M) de 6 mils (6m) sur chacune des surfaces de contact, avec les bavures enlevées (S), pour lequel la force de serrage équivaut à 70% (70%) de la capacité en tension du boulon. Pareillement, SP6-0m-90%-S est un échantillon composé de plaques découpées par un grenailage commercial jusqu'à l'obtention de surface SSPC-SP6 avec les bavures enlevées (S), soumis à un test avec une force de serrage équivalente à 90% de la capacité en tension du boulon.

Tableau 1: Paramètres étudiés

#	Paramètres	Variables
1	État de surface	SSPC-SP6 - SP6
		SSPC-SP5 - SP5
		M- métallisé
		MG- métallisé et galvanisé
2	Force de serrage	70%- minimum pour boulons A325 (70%)
		90%- 90% pour les boulons A325
3	Épaisseur de revêtement	0m- 0 mils (SP6 ou SP5)
		6m- 6 mils
		12m- 12mils

Le profil angulaire après le décapage pour chaque plaque d'essai a été mesuré pour certifier que les exigences de la norme soient respectées. Le tableau 2 montre le profil angulaire moyen (en millièmes de pouce) ainsi que l'épaisseur moyenne du revêtement (mesurée selon la norme SSPC-PA2) qui a été appliquée pour chaque type d'échantillon testé.

Tableau 2: Type de surfaces d'échantillon

Type de surface	Préparation de surface		Épaisseur de revêtement nominale [mils]
	SSPC*	Profil angulaire moyen [mils]	
Décapée à SP6	SP6	2,6	0
Décapée à SP5	SP5	4,5	0
Métallisée 12 mils	SP5	4,5	12
Métallisée 6 mils	SP5	4,5	6
Galvanisée	SP8	2,6	19

*SSPC signifie la spécification de Society for Protective Coatings

2.3 Assemblage et essais sur les échantillons

Le schéma d'assemblage des plaques pour former un échantillon d'essais est montré sur la figure 1 (a). Le spécimen est composé d'une plaque de milieu et de deux plaques d'extrémité. La figure 1 (b) montre un gabarit d'assemblage qui a été spécialement fabriqué pour s'assurer de la répétabilité des tests ainsi que pour toujours obtenir le même espacement entre le boulon et le trou du boulon.

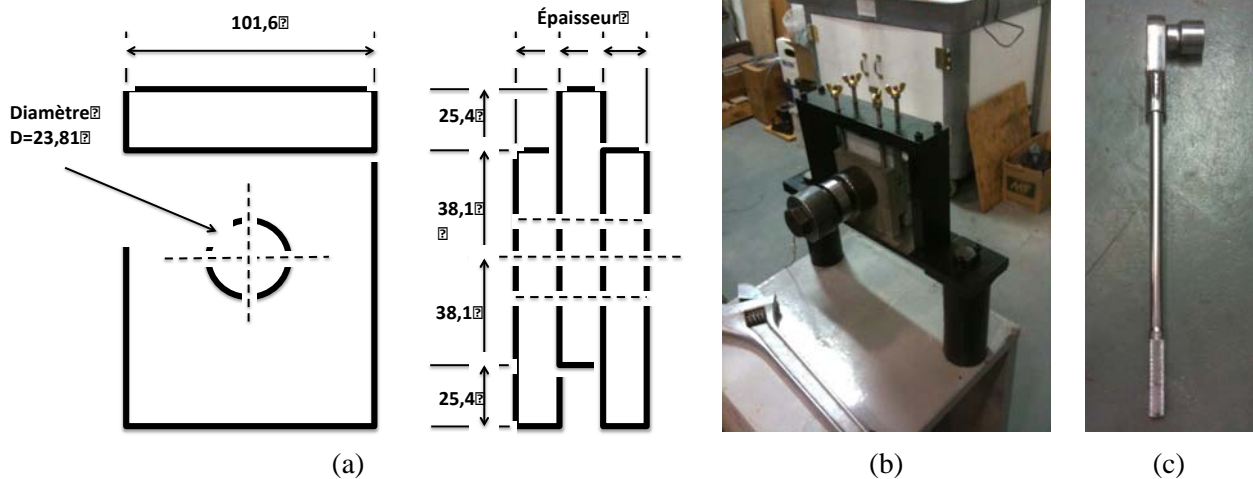


Figure 1: Échantillon et gabarit d'assemblage en compression

Il était essentiel de connaître la force de serrage durant les tests, car elle influence grandement le développement de la résistance de glissement entre les plaques. Dans cette recherche, la force de serrage a été appliquée manuellement en utilisant une clé à cliquet (figure 1(c)) pour simuler les conditions de chantier. Elle était contrôlée, en temps réel, à l'aide d'une cellule de chargement LCWD Omega de 500 kN de capacité, étant installée en série avec les plaques de test serrées ensemble. Tous les composants de l'assemblage sont présentés sur la figure 2 (a). Les tests de glissement en compression ont été effectués sur la presse hydraulique MTS de 1500 kN de capacité montrée à la figure 2 (b). Après l'assemblage, l'échantillon a été soigneusement placé sur la presse de façon particulière ce qui a permis de minimiser l'excentricité du chargement. Le taux de chargement appliqué lors des tests était de 100 kN/minute. Le déplacement relatif entre la plaque au milieu et les plaques d'extrémité a été mesuré en utilisant deux LVDT. Les tests ont été arrêtés quand un déplacement significatif a été enregistré, typiquement plus grand que 1,5 mm.

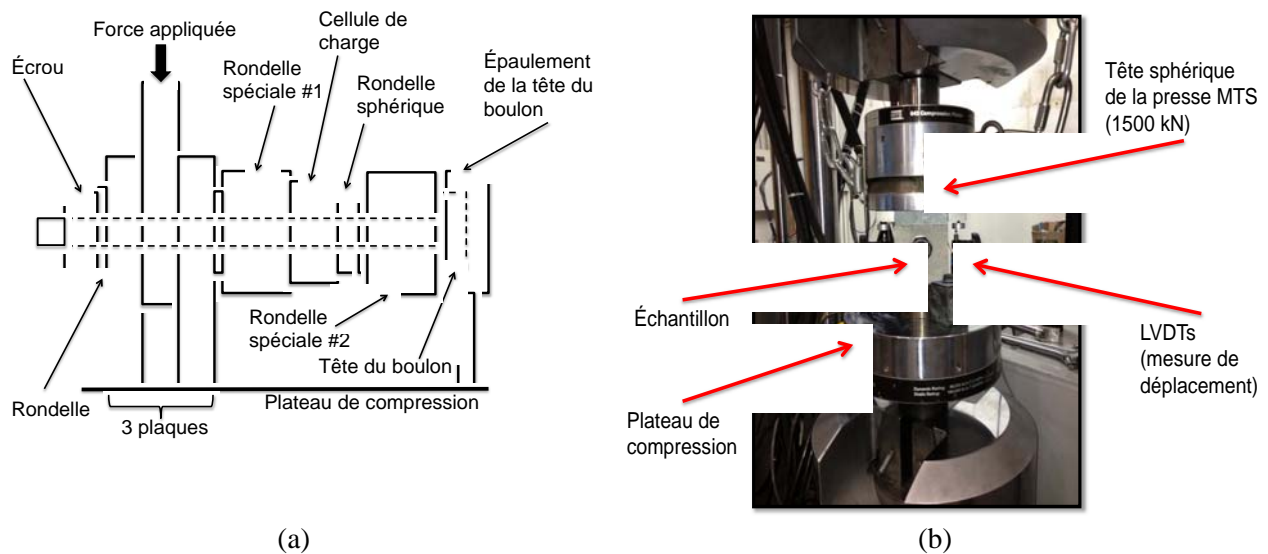


Figure 2: Montage d'essai en compression

3.0 Résultats et discussion

La force de serrage, transmise par le boulon aux plaques, a été observée en continu lors des tests. La table 3 présente la réduction observée de la force de serrage durant les tests en compression à court terme. Cette réduction est présentée en pourcentage de la force de serrage initiale. En général, les surfaces sans revêtement respectaient les recommandations de RCSC (2009) de $\pm 1\%$ quant au maintien de cette force. Cependant, dans le cas des surfaces de contact métallisées et combinées (métallisées-galvanisées), la réduction de la force de serrage était plus grande, celle-ci allant jusqu'à $-3,71\%$ de la précontrainte initiale. En général, l'augmentation de l'épaisseur de revêtement (de 6 mils à 12 mils) occasionnait une augmentation de la réduction de la force de serrage. La même observation a été faite pour ce qui est de variation de la force de précontrainte (une force de serrage de 90% causait une plus grande réduction que 70%). Pour mieux connaître le phénomène de la réduction de la force de serrage, des tests à long terme doivent être effectués.

Tableau 3: Réduction moyenne de la force de serrage durant les essais

I.D. d'échantillon	Réduction moyenne durant le test [%]	I.D. d'échantillon	Réduction moyenne durant le test [%]
Tests de contrôle			
SP6-0m-70%	0,88		
SP5-0m-70%	0,82		
Métallisée		Combinée	
M-6m-70%	1,05	MG-6m-70%	1,11
M-12m-70%	1,62	MG-12m-70%	1,27
M-6m-90%	1,85	MG-6m-90%	2,37
M-12m-90%	3,45	MG-12m-90%	3,71

Les résultats des essais ont permis de calculer le coefficient de frottement, k_s , pour chaque échantillon selon l'équation :

$$k_s = \frac{\text{force de glissement}}{\text{force de serrage} \times \text{nombre de plans de glissement} (= 2)}$$

Le tableau 4 présente les coefficients de frottement moyens calculés pour tous les essais.

Les coefficients de frottement moyens pour les surfaces sans revêtement (les surfaces de contact préparées à SP6 et SP5) obtenus suite aux tests de contrôle étaient de 0,38 (allant de 0,35 à 0,41) et 0,53 (allant de 0,51 à 0,55) respectivement. Ces coefficients obtenus correspondent à la classe A et à la classe B de la norme CAN/CSA-S6-06 avec des coefficients de frottement spécifiés à 0,33 et 0,5 respectivement.

Tableau 4: Coefficients de frottement moyens

I.D. d'échantillon	k₁	k₂	k₃	k₄	k₅	k_{moyen}	Écart-type
Tests de contrôle							
SP6-0m-70%	0,39	0,35	0,41			0,38	0,03
SP5-0m-70%	0,51	0,55	0,52			0,53	0,02
Métallisée							
M-6m-70%	0,88	0,81	0,77	0,80	0,84	0,82	0,04
M-12m-70%	0,80	0,76	0,91	0,92	0,86	0,85	0,07
M-6m-90%	0,78	0,74	0,73	0,86	0,73	0,77	0,06
M-12m-90%	0,89	0,89	-	0,91	0,94	0,91	0,02
Combinée							
MG-6m-70%	0,57	0,62	0,59	0,63	0,55	0,59	0,04
MG-12m-70%	0,64	0,62	0,71	0,71	0,57	0,65	0,06
MG-6m-90%	0,48	0,49	0,47	0,51	0,49	0,49	0,01
MG-12m-90%	0,58	0,60	0,61	0,60	0,57	0,59	0,02

Les coefficients de frottement obtenus suite aux essais sur les échantillons avec un revêtement de métallisation ont été beaucoup plus élevés que les spécifications de la norme pour les classes A, B ou C. Les écarts-types observés, allant de 0,01 à 0,09, sont acceptables. La valeur minimale du coefficient de frottement moyen de 0,77 a été obtenue pour les échantillons avec un revêtement de métallisation de 6 mils, serrés à 90% de la capacité en tension de boulon. Pour exactement les mêmes conditions d'échantillon, mais avec un revêtement de métallisation de 12 mils d'épaisseur, les tests ont montré une augmentation de coefficient de glissement de 0,77 à 0,91. Pour les tests effectués avec 70% de force de serrage, l'augmentation de la résistance avec l'augmentation de l'épaisseur de métallisation est moins prononcée que celle pour les tests avec 90% de force de serrage. La figure 3 montre la comparaison des coefficients de frottement moyens pour les tests de contrôle sans revêtement ainsi que pour les tests sur les surfaces de contact métallisées.

Les coefficients de frottement moyens obtenus suite aux essais sur les surfaces de contact combinées (métallisé-galvanisé) sont supérieurs au coefficient de frottement de classe B de la norme canadienne CAS/CSA-S6-06. La seule exception est un type d'échantillon avec un coefficient moyen de 0,49 et avec un écart-type de 0,01, ce qui est légèrement inférieur à la norme. Il s'agit d'un type d'échantillon testé avec un revêtement de métallisation de 6 mils d'épaisseur avec une force de serrage de 90%. Une augmentation de la résistance au glissement a été observée en diminuant la force de serrage à 70%, ce qui a mené à un coefficient de frottement moyen de 0,59. Ce même effet d'augmentation peut-être observé sur les échantillons avec un revêtement de métallisation de 12 mils d'épaisseur, soit 0,59 pour une force de serrage de 90% et 0,65 pour une force de serrage de 70%. La figure 4 montre la comparaison des coefficients de frottement moyens pour les tests de contrôle ainsi que pour les tests sur les surfaces de contact combinées.

Il est à noter que les surfaces galvanisées sont placées dans la classe C (surface galvanisée à chaud broyée) de la norme canadienne S6-06 avec un coefficient de frottement de 0,4. De plus, un broyage manuel doit être effectué afin de les rendre rugueuses, car il a été démontré expérimentalement que ce traitement additionnel améliore significativement la résistance au glissement. À partir des résultats de cette recherche, il est possible de déduire que les assemblages de type antiglissement avec une surface métallisée et l'autre galvanisée, développent une résistance au glissement supérieure à celle spécifiée pour la classe C. Il est important de spécifier que les surfaces galvanisées utilisées dans ces travaux expérimentaux n'ont pas été broyées, ce qui peut normalement aboutir à une résistance au glissement inférieure à celle de la classe C.

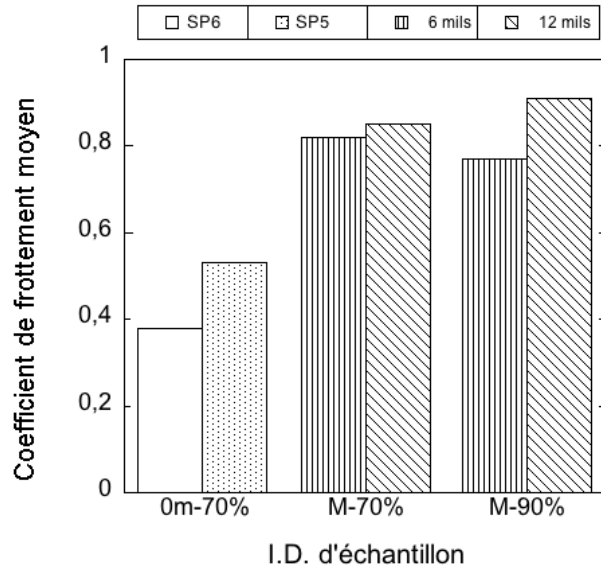


Figure 3: Comparaison des coefficients de frottement moyens pour les surfaces de contact métallisées

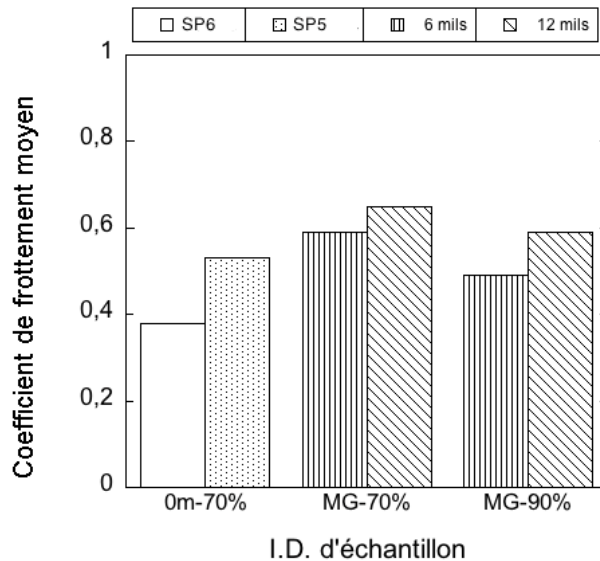


Figure 4: Comparaison des coefficients de frottement moyens pour les surfaces de contact combinées (métallisées-galvanisées)

4.0 Conclusion

Dans cette étude, la résistance au glissement des assemblages de type antiglissement avec les surfaces de contact métallisées et combinées (métallisées-galvanisées) a été analysée et caractérisée au regard des normes canadiennes pour la conception des structures en acier. Les observations faites dans l'étude peuvent être résumées comme suit:

1. Les tests de contrôle qui ont été effectués sur les échantillons avec une surface de contact sans revêtement, avec les traitements SSPC SP6 ainsi que SP5, correspondent respectivement aux surfaces de classe A et de classe B des normes canadiennes pour la conception des structures en acier.
2. Les surfaces de contact métallisées offrent une résistance au glissement supérieure à celle des surfaces sans revêtement avec des valeurs moyennes allant de 0,77 à 0,91 et avec des écarts-types raisonnables allant de 0,02 à 0,07.
3. Une augmentation de l'épaisseur du revêtement métallisé (de 6 mils à 12 mils), en général, conduit à une augmentation de la résistance au glissement des surfaces de contact métallisées.
4. La résistance au glissement donnée par la combinaison de deux revêtements (une surface métallisée et l'autre galvanisée) est supérieure au coefficient de frottement typique de la classe C (galvanisées à chaud), et dans certains cas, supérieure à la classe B.
5. Les surfaces de contact métallisées ainsi que les surfaces de contact combinées ont démontré une réduction de la force de serrage supérieure à celle des surfaces sans revêtement.
6. L'augmentation de l'épaisseur de la couche de métallisation (6 mils à 12 mils) conduit à une augmentation de la réduction de la force de serrage durant les essais.

Remerciements

Cette étude a été soutenue par Structal-Ponts, une division de Groupe Canam, dans le cadre d'une recherche collaborative avec l'Université Laval. Les auteurs tiennent à exprimer leur profonde gratitude pour ce soutien.

Références

- AASHTO M 111M/M 111-11. 2011. Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products (ASTM Designation: A 123/A 123M-09), *American Association of State and Highway Transportation Officials*. 14 pp.
- Birkemoe, P.C. and Herrschaft, D.C. 1970. Bolted Galvanized Bridges-Engineering Acceptance Near, *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 40, No. 4, pp.42-46.
- CAN/CSA S6-06. 2006. Canadian Highway Bridge Design Code, *Canadian Standards Association, Mississauga*.
- Gerdeman, D. A. and Hecht, N. L. 1972. Arc Plasma technology in Materials Science, *Springer-Verlag*, 206 pages.
- Research Council on Structural Connections (RCSC). 2009. Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts, *American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois*.