

## Amélioration de la durée de vie en fatigue du conducteur en utilisant une pince de suspension avec des élastomères coniques

J. PARADIS, P. VAN DYKE  
Institut de Recherche d'Hydro-Québec  
Canada

### SOMMAIRE

Il est connu que lorsque soumis au phénomène de vibrations éoliennes, les conducteurs tendent à s'endommager près des endroits où leur mouvement est restreint, tel qu'à la sortie des pinces de suspension. En effet, le mouvement de flexion alternée engendre la rupture des fils en fatigue par *fretting* lorsque le conducteur n'est pas suffisamment amorti. Pour cette raison, Hydro-Québec et *Helix* ont développé en collaboration il y a quelques années un nouveau modèle de pince de suspension comportant des élastomères de forme conique à ses deux extrémités, ce qui permet de diminuer graduellement la rigidité de l'encastrement à la sortie de la pince et donc de réduire la sévérité de la flexion du conducteur qui vibre.

Afin de quantifier l'amélioration de la durée de vie en fatigue d'un conducteur dans cette nouvelle pince de suspension semi-rigide par rapport à une pince standard métal-métal, des essais expérimentaux de sollicitation en fatigue par flexion alternée du conducteur ont été réalisés à l'IREQ avec le conducteur Crow (ACSR 54/7). Le conducteur a été installé sur une portée de laboratoire de 7,8 mètres et mis sous tension à l'aide de masses au bout d'un bras de levier. Le conducteur est excité verticalement à l'aide d'un pot vibrant afin d'obtenir le sixième mode de vibration de la portée.

Ces essais ont permis d'établir la courbe de type S/N, soit l'amplitude de vibration multipliée par la fréquence de résonance ( $fY_{\max}$ ) en fonction du nombre de cycles avant la rupture. Ces résultats sont comparés avec des résultats expérimentaux effectués sur la pince métal-métal réalisés précédemment à l'IREQ, avec les résultats obtenus au GREMCA [3] pour ce même conducteur et la même pince ainsi qu'avec les résultats disponibles dans [4] pour les conducteurs ACSR à trois couches d'aluminium dans une pince métal-métal. Il a aussi été possible de calculer une « limite sécuritaire » à ne pas dépasser pour avoir une durée de vie théoriquement infinie et de la comparer avec celle disponible dans la littérature pour une pince métal-métal [6].

Les résultats montrent que la pince semi-rigide améliore d'une façon importante la durée de vie du conducteur. En effet, une augmentation de 68% de la contrainte alternée théorique à laquelle le conducteur peut vibrer durant 500 millions de cycles sans bris est obtenue. La limite sécuritaire présente quant à elle une augmentation de 71%. L'analyse statistique faite selon une distribution de *student* pour un intervalle de confiance de 95% confirme que l'augmentation de la contrainte alternée pour 500 millions de cycles est significative. Les résultats ont aussi été établis en fonction de l'amplitude à 89mm du dernier point de contact dans la pince ainsi qu'en fonction du paramètre  $fY_{\max}$  afin d'établir une référence à ne pas dépasser lors de la détermination du système d'amortissement à utiliser.

### MOTS CLÉS

Limite d'endurance, fatigue, pince de suspension, élastomère, conducteur

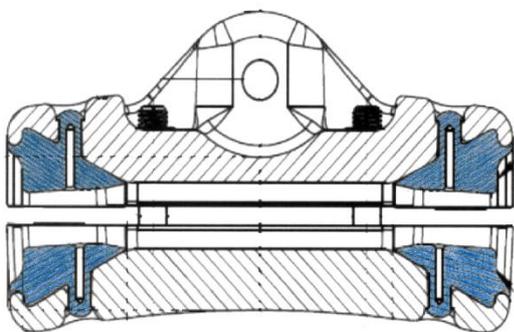
## INTRODUCTION

Le phénomène de fatigue par *fretting* dû à la flexion alternée du conducteur est maintenant bien connu [EPRI, 1979] [EPRI, 2009]. Ce type de fatigue est principalement causé par les vibrations éoliennes mais peut aussi se produire lorsqu'il y a du galop ou des oscillations de sous-portée. Les vibrations éoliennes peuvent être contrôlées avec un système d'amortissement adéquat et les oscillations de sous-portée avec un système d'entretoises adéquates bien positionnées. Le galop des conducteurs est plus difficile à contrôler mais il a été démontré que les entretoises interphases, en plus d'empêcher l'entrechoquement des conducteurs, réduisent l'amplitude du galop. De la fatigue peut tout de même se produire et affecter la pérennité des lignes [1].

Afin de diminuer la sévérité de la flexion du conducteur à la sortie de la pince de suspension, une nouvelle pince a été conçue à l'institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) dans les années 2000 avec les caractéristiques suivantes :

- Conserver une partie métallique au centre de la pince de suspension pour avoir un bon contact conducteur/pince afin de satisfaire les critères de glissement du conducteur dans la pince
- Ajouter des élastomères ayant une forme conique à chaque extrémité (en bleu à la Figure 1) pour réduire graduellement la rigidité de l'encastrement à la sortie de la pince et, conséquemment, réduire de façon significative la sévérité de la flexion du conducteur pour une même fréquence et amplitude de vibration au ventre

En 2010, la conception de la pince de suspension semi-rigide a été complétée conjointement par Hydro-Québec et Helix Uniforme Ltée (Figure 1) où Hydro-Québec a travaillé principalement sur la géométrie de la pince et Helix a fabriqué les prototypes et a fourni l'expertise pour la fabrication de la pince de façon industrielle. La coquille métallique a été conçue afin de faciliter le travail des monteurs en mettant l'emphasis sur les travaux sous tension.



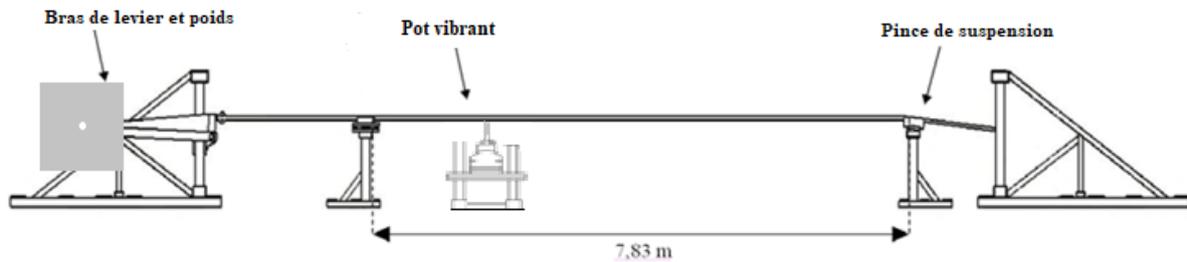
**Figure 1: Vue en coupe de la pince semi-rigide Helix 95-325-405 à l'essai (élastomères en bleu)**

Cette pince est maintenant installée systématiquement sur toutes les nouvelles lignes du réseau de transport d'Hydro-Québec ou bien lors de remplacement. Bien qu'il soit connu que les élastomères insérés dans la pince réduisent la sévérité de la courbure du conducteur à la sortie de la pince de suspension, son efficacité à prolonger la durée de vie du conducteur n'avait pas été quantifiée jusqu'à présent. L'élément élastomère pourrait aussi introduire un amortissement supplémentaire dans le système, ce qui contribuerait à réduire la sévérité des vibrations mais cet effet n'est pas pris en compte dans cette étude.

## MONTAGE EXPÉRIMENTAL

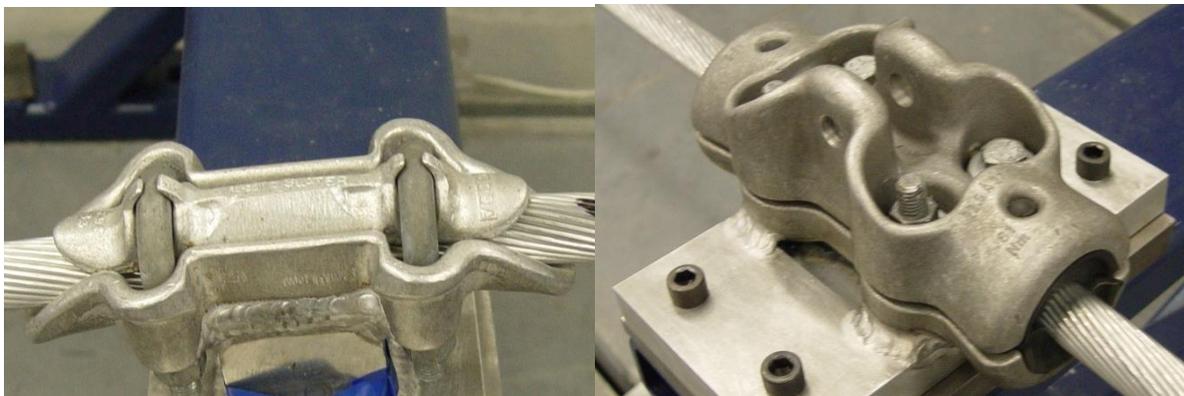
Un banc d'essai (Figure 2) comportant trois portées de laboratoire a été conçu à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec en suivant les recommandations de la norme CEI [2]. Trois autres portées ont été ajoutées plus tard. Pour ces essais, les portées ont été ajustées à une longueur de 7,83 m. Un pot

vibrant électromagnétique est utilisé pour exciter verticalement chacune des portées d'essai. La tension mécanique est appliquée et maintenue constante à l'aide de masses au bout d'un bras de levier. L'amplitude des vibrations est contrôlée en utilisant un capteur de déplacement situé à un ventre de vibration. Le conducteur est donc excité à une fréquence et à une amplitude fixes jusqu'à ce que surviennent le bris de trois de ses fils. Les essais ayant subi 500 millions de cycles de vibrations sans bris sont considérés comme ayant une durée de vie virtuellement infinie. Étant donnée la dispersion des résultats d'essais de fatigue, il est recommandé de réaliser trois essais par niveau d'amplitude.



**Figure 2: Schéma des portées de laboratoire**

Les essais ont été effectués sur un conducteur Crow (ACSR 54/7) à une tension mécanique de 29 kN (25% CRN). Des essais avec une pince de type métal-métal (modèle Slacan 62065) ont préalablement été réalisés afin d'avoir un élément de comparaison provenant du même montage d'essai (Figure 3). Ces essais ont aussi été comparés à des essais effectués au GREMCA<sup>1</sup> avec le même conducteur à la même tension mécanique et la même pince de suspension pour s'assurer que les résultats obtenus sont comparables [3].



**Figure 3: Pinces de suspension (métal-métal Slacan 62065 à gauche et semi-rigide Helix 95-325-405 à droite)**

## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La Figure 4 présente, une comparaison du nombre de cycles avant la rupture pour les essais effectués à l'IREQ avec la pince métal-métal (en bleu) et la pince semi-rigide (en rouge). La série de points blancs représente les essais effectués au laboratoire GREMCA avec la même pince métal-métal [3] qui a été ajoutée au graphique à titre comparatif. Les points avec des flèches illustrent les essais pour lesquels il n'y a pas eu de bris. Il est à noter que les valeurs exprimées en contraintes représentent une contrainte virtuelle calculée à partir du paramètre  $fY_{\max}^2$ . Elle ne correspond pas à la contrainte locale qui cause la rupture et qui serait mesurée si une jauge était positionnée à cet endroit, tel que décrit dans [4].

<sup>1</sup> GREMCA : Groupe de Recherche en Mécanique des Conducteurs Aériens

<sup>2</sup>  $fY_{\max}$  : Paramètre standard représentant le produit de la fréquence et de l'amplitude au ventre (crête)

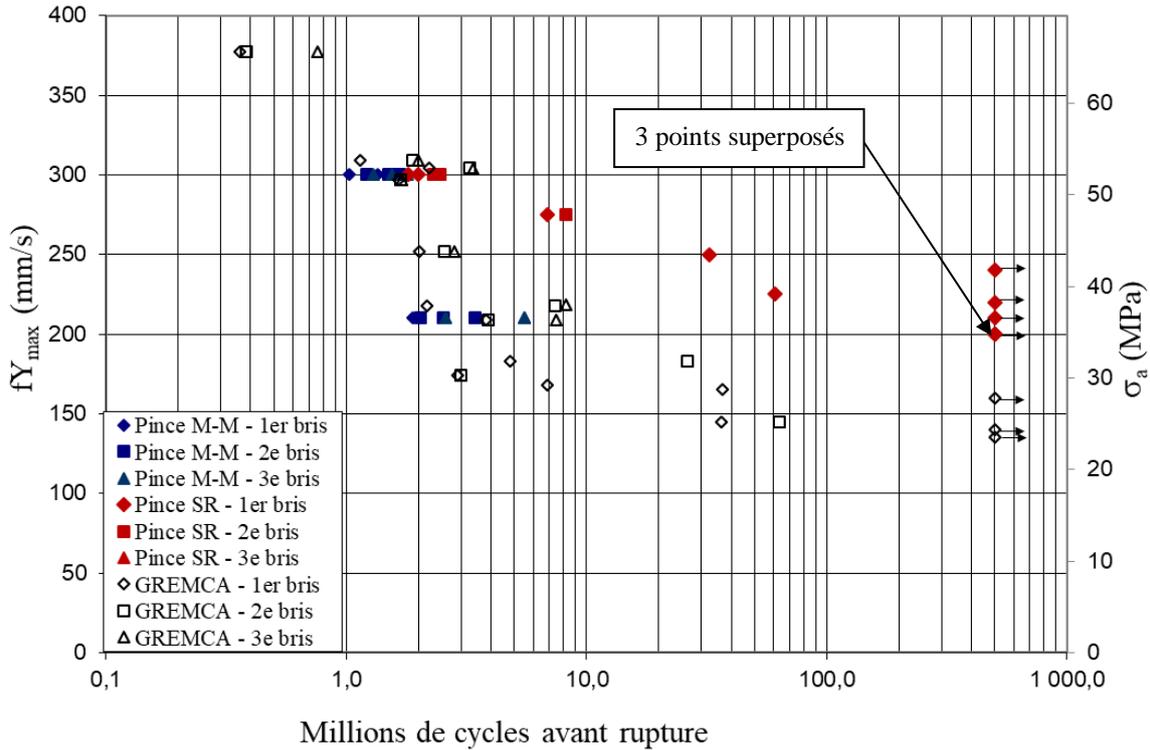


Figure 4: Comparaison du nombre de cycles avant la rupture pour les deux pinces à l'essai

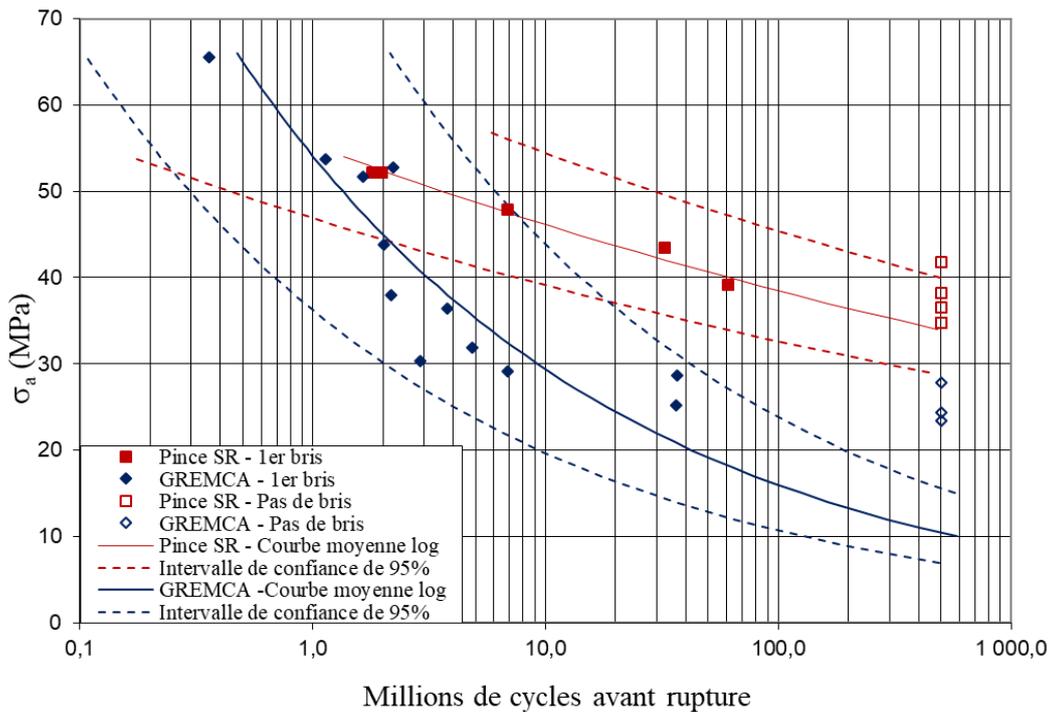
#### CALCUL DE LA LIMITE D'ENDURANCE

La limite d'endurance peut être estimée de différentes façons. La méthode la plus utilisée est la contrainte la plus élevée pour laquelle aucun bris n'est survenu à 500 millions de cycles [2,4,5]. Selon les résultats présentés ci-haut, la limite est de 140 mm/s (24 MPa) pour la pince métal-métal selon les données du GREMCA et de 220 mm/s (38 MPa) pour la pince semi-rigide. Il s'agit donc d'une amélioration de la limite d'endurance de 58% avec la pince semi-rigide.

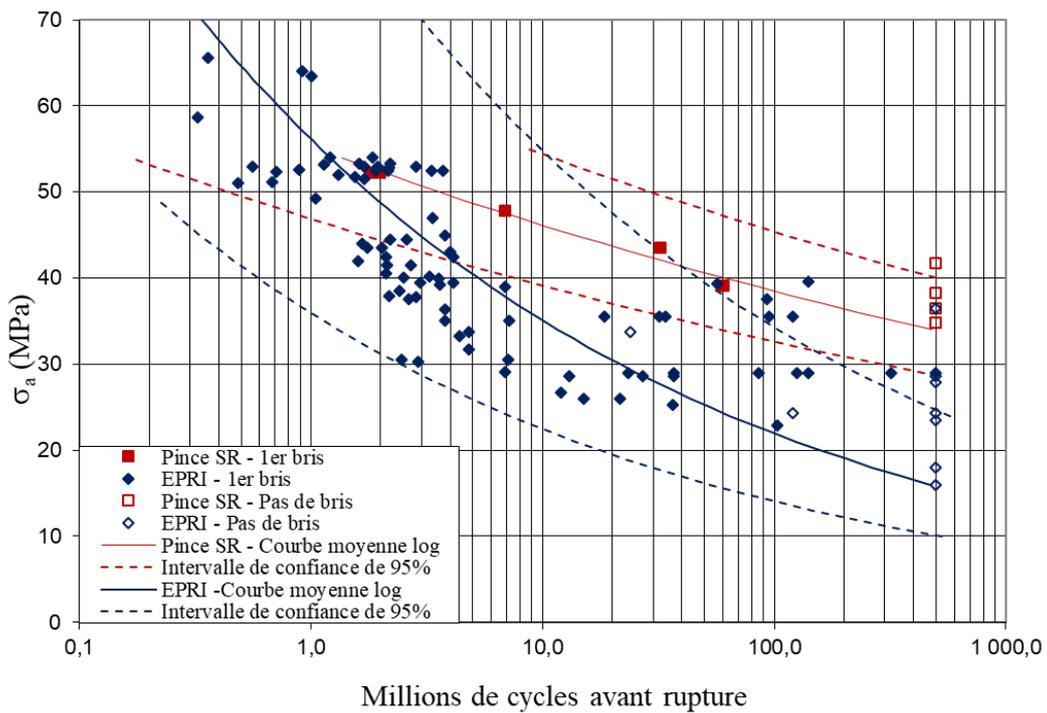
Une autre méthode a été présentée par Hardy et Leblond [6] permettant de calculer une " limite sécuritaire ". Ils obtiennent premièrement une courbe moyenne en cherchant la meilleure concordance de la distribution avec l'équation suivante :

$$\ln(\tilde{N}) = a + b \ln(\sigma_a - \sigma_d)$$

où  $\sigma_d$  serait la vraie limite d'endurance,  $\tilde{N}$  le nombre de cycle avant le premier bris et a et b les constantes à déterminer. Toutefois, l'évaluation de cette expression faite par les auteurs avec plusieurs séries données d'essai a montré que l'écart avec les résultats expérimentaux est toujours moindre lorsque  $\sigma_d = 0$  puisque le nombre de cycle avant la rupture ne cesse d'augmenter lorsque la contrainte tend vers zéro. Elle sera donc toujours posée comme étant égale à zéro par la suite. La Figure 6 présente la courbe obtenue à partir des essais réalisés sur la pince semi-rigide comparés à ceux du GREMCA [3] pour le même conducteur dans la même pince-métal-métal. Les limites d'un intervalle de confiance de 95% obtenu à partir de la distribution de Student sont aussi tracées. À titre de comparaison avec un plus large échantillon, les données obtenues pour la pince semi-rigide sont aussi comparées aux données présentées par EPRI [4] regroupant des résultats expérimentaux provenant de plusieurs essais dans des pinces métal-métal et avec différents types de conducteurs ACSR ayant trois couches de fils d'aluminium. Il est à noter que pour tous ces résultats les essais sans bris ne sont pas pris en compte dans le calcul et que les points provenant de [4] ont été prélevés manuellement de la figure 3.2-13b.



**Figure 5 : Comparaison des courbes logarithmiques moyennes pour un conducteur Crow dans la pince semi-rigide et dans la pince métal-métal selon [3]**



**Figure 6: Comparaison des courbes logarithmiques moyennes pour un conducteur à 3 couches d'aluminium dans la pince semi-rigide et dans la pince métal-métal selon [4]**

Même si les points pour les essais sur la pince semi-rigide sont moins nombreux, il est possible d'observer l'amélioration de la durée de vie en fatigue ainsi que l'augmentation de la contrainte pour laquelle il n'y a pas de bris à 500 millions de cycles. À titre comparatif, le Tableau 1 présente le rapport entre le nombre de cycles avant la rupture des deux pinces pour certaines valeurs de contraintes le long

des courbes S-N. On peut voir que l'amélioration est plus importante pour des niveaux de contrainte plus faibles.

**Tableau 1 : Ratio du nombre de cycles avant bris entre les deux courbes S-N pour différentes valeurs de  $\sigma_a(fY_{max})$**

$\sigma_a$ (MPa)	Ratio courbes S-N (SR/m-m)
30	255
40	20
50	2,7

La limite sécuritaire  $\sigma_{al}$  présentée dans [6] est obtenue en l'isolant dans la relation suivante :

$$\ln(\sigma_{al}) = \frac{\ln(500 \cdot 10^6) - a + s t_{0.05, n-2}}{b}$$

où  $s$  est l'écart-type et  $t_{0.05, n-2}$  représente le facteur de *Student* à 5% et pour  $n-2$  dimensions. Cette limite correspond à une probabilité de 95% de ne pas avoir de bris à 500 millions de cycles. On obtient dans ce cas une limite sécuritaire de 8 MPa pour la pince métal-métal et de 30 MPa (173 mm/s) pour la pince semi-rigide, soit une amélioration de 275%. Une autre façon d'estimer la limite d'endurance serait de prendre l'intersection de la courbe moyenne à 500 millions de cycles qui est de 10 MPa pour la pince métal-métal et 34 MPa pour la pince semi-rigide, soit une amélioration de 240%. En prenant la borne inférieure pour un intervalle de 95%, tel qu'illustré à la Figure 6, la limite est de 7 MPa pour la pince métal-métal et de 29 MPa pour la pince semi-rigide, soit une amélioration de 314%.

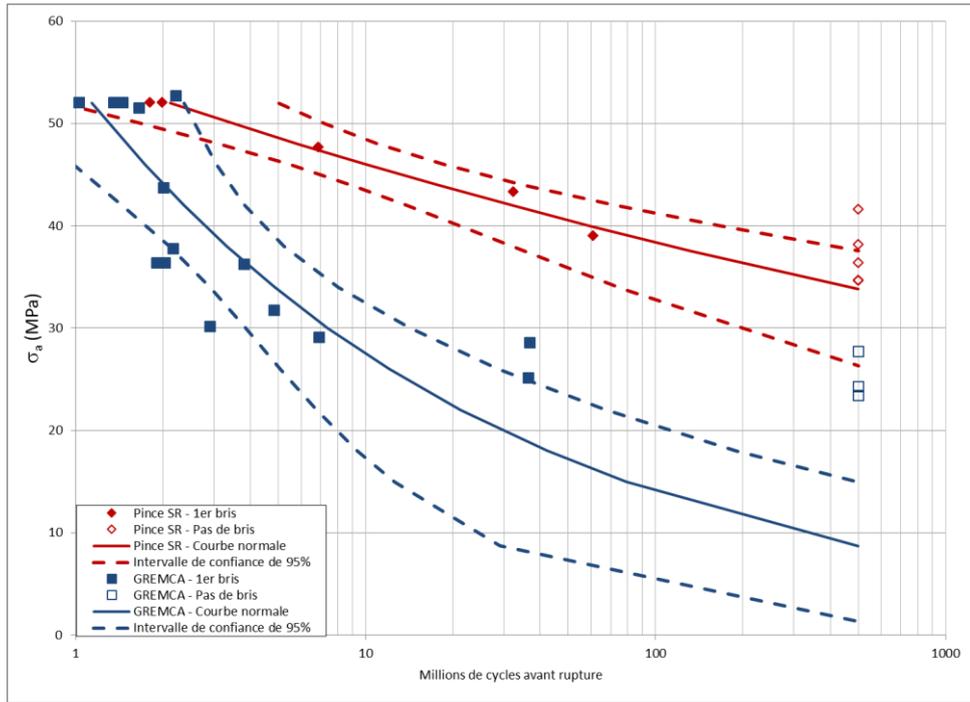
Selon la norme ASTM E739 [7] portant sur la représentation des résultats d'essais de fatigue standard, l'intervalle de confiance est tracé d'une autre façon, soit selon la relation suivante :

$$Y = \hat{A} + \hat{B}X \pm \sqrt{2F_p \hat{\sigma}} \left[ \frac{1}{k} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{1/2}$$

où

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{et} \quad \hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X}$$

et où  $X$  représente  $\log(\sigma)$ ,  $Y$  représente  $\log(N)$ ,  $F_p$  est le coefficient correspondant à une distribution de Fisher pour une probabilité de 95%,  $\hat{\sigma}$  l'écart-type,  $k$  le nombre d'essais, le symbole  $(\bar{\quad})$  représente une moyenne et  $(\hat{\quad})$  une estimation. Les points ayant des contraintes plus élevées pour la pince métal-métal n'ont pas été pris en compte afin d'avoir la même plage de contrainte pour les deux pinces. Le résultat est présenté à la Figure 7. Dans ce cas, la borne inférieure de l'intervalle de confiance de 95% est 1,3 MPa pour la pince métal-métal et 26 MPa pour la pince semi-rigide.



**Figure 7: Comparaison des courbes normales et de leurs intervalles pour les pincés semi-rigide et métal-métal selon [7]**

Que ce soit pour la Figure 6 ou la Figure 7, les courbes ont été prolongées jusqu'à 500 millions de cycles afin d'estimer une limite d'endurance. Cette façon de faire n'est toutefois pas recommandée dans la norme ASTM puisqu'il n'y a pas de données d'essai à 500 millions de cycles ou plus. Il est donc imprécis d'extrapoler la courbe dans ces environs. Les limites calculées de cette façon sont donc sujettes à précautions.

Le Tableau 2 présente un résumé des « limites d'endurance » obtenues ainsi que du pourcentage d'amélioration de la pince semi-rigide par rapport à la pince métal-métal à partir des résultats d'essai à l'IREQ et au GREMCA sur le conducteur Crow. Il est possible de remarquer que ces méthodes produisent des résultats très variés. Il ressort aussi que toutes les limites obtenues, à l'exception de la contrainte la plus élevée sans bris à 500 millions de cycles, sont assez éloignées de la limite de 24 MPa indiquée dans [4] pour les conducteurs ACSR à trois couches d'aluminium dans la pince métal-métal.

**Tableau 2: Comparaison des limites d'endurance pour les deux pincés**

		500 Mc le plus élevé sans bris	Limite sécuritaire [6]	Courbe moyenne à 500 Mc	Borne inférieure 95% à 500 Mc	
					Selon [6]	Selon [7]
Pince métal-métal	$\sigma_a$ (MPa)	24	8	10	7	1,3
	$fY_{max}$ (mm/s)	140	46	58	40	7,5
Pince semi-rigide	$\sigma_a$ (MPa)	38	30	34	29	26
	$fY_{max}$ (mm/s)	219	173	196	167	150
		+ 58%	+ 275%	+ 240%	+ 314%	+1900%

## CONCLUSION

Des essais de fatigue sur l'ensemble conducteur - pince de suspension ont été réalisés dans le but de comparer la performance de la pince semi-rigide développée il y a quelques années (Helix 95-325-405) avec celle de la pince métal-métal de modèle Slacan 62065. Les essais ont été effectués en respectant la norme CEI [2] et les résultats obtenus ont été comparés à ceux du laboratoire GREMCA présentés dans [3] ainsi que tous ceux recueillis pour les conducteurs ACSR à trois couches d'aluminium présentés dans [4].

La limite d'endurance a été obtenue en utilisant la méthode décrite dans la brochure CIGRE TB 429 [5], soit la plus haute contrainte ou amplitude la plus élevée pour laquelle aucun bris n'est survenu à 500 millions de cycles pour laquelle une amélioration de 58% a été obtenue.

Les résultats ont montré une amélioration notable de la durée de vie en fatigue du conducteur avec l'usage de la pince semi-rigide.

D'autres traitements statistiques décrits dans [6] ont aussi été utilisés sur les données de fatigue pour comparer la performance des deux pinces. Une limite sécuritaire qui représente une probabilité de 95% de l'absence de bris à 500 millions de cycles a été déterminée. Une amélioration de 275% a été observée dans ce cas. Et finalement, l'intersection de la courbe moyenne et de la borne inférieure d'un intervalle de confiance de 95% calculée selon [6] ou selon [7] ont donné des améliorations respectives de 240%, 314% et 1900%. Une grande variation est présente au niveau des limites d'endurance calculées et elles sont, en général, assez éloignées de la limite d'endurance de 24 MPa pour la pince métal-métal présentée dans [4]. Des données d'essais pour un nombre de cycles supérieur à 500 millions seraient intéressantes à obtenir afin d'estimer plus précisément cette limite.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Van Dyke, D. Havard, A. Laneville (2009) *Atmospheric icing of power networks, Chapter 5: Effect of ice and snow on the dynamics of transmission line conductors*
- [2] IEC (1998). 62568 ed 1.0 : *Method for fatigue testing of conductors for overhead lines*.
- [3] GREMCA, Université Laval, *Essais de fatigue du conducteur ACSR Crow avec amplitude variant selon une distribution de Rayleigh*, Rapport No. SM-2002-07, août 2002, Québec, Canada
- [4] EPRI (2009). *Transmission line reference book: Wind-induced conductor motion*, Deuxième édition. Electric power research institute (EPRI), Palo Alto, CA
- [5] CIGRE TB 429 (2010) *Engineering guidelines relating to fatigue endurance capability of conductor/clamp systems*.
- [6] C. Hardy et A. Leblond, *Statistical analysis of stranded conductor fatigue endurance data*, Proc. 4th Int. Symp. Cable Dynamics, Montreal, Canada, 28-30 May 2001, p. 195-202.
- [7] ASTM E739-10 (2010) *Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain-life ( $\epsilon$ -N) fatigue data*, 6 p.