

Validation d'un conducteur AACSR avec fils trapézoïdaux pour une traversée de rivière

P. VAN DYKE¹, S. PRUD'HOMME², J. PARADIS¹

¹Institut de Recherche d'Hydro-Québec ²Hydro-Québec
Canada

SOMMAIRE

Le conducteur de la traversée du fleuve St-Laurent d'une ligne à 230 kV sera remplacé sur le réseau de TransÉnergie pour assurer sa pérennité. Cette traversée limite aussi présentement la capacité de transit de la ligne. Pour remplacer le conducteur actuel, les ingénieurs de conception de ligne ont proposé d'utiliser un conducteur AACSR à fils trapézoïdaux pour augmenter la section d'aluminium du conducteur sans changer son diamètre externe. Cette solution permet d'augmenter la capacité de transit de la ligne sans augmenter les charges climatiques de glace et de vent.

La portée a une longueur de 1,46 km et la tension mécanique du conducteur est très élevée, soit 230 kN, ce qui correspond à un paramètre de ligne H/w (tension mécanique sur le poids linéique du conducteur) de 6350 m. Un paramètre aussi élevé augmente la sévérité des vibrations éoliennes qui peuvent générer de la fatigue et le bris du conducteur puisqu'il dépasse de loin la tension sécuritaire recommandée par le CIGRÉ pour un conducteur simple avec amortisseurs [CIGRE TB 273, 2005]. De plus, le conducteur est retenu dans un manchon d'ancrage à chaque extrémité de la portée et il n'y a pas de donnée de fatigue disponible pour une telle configuration de conducteur. Pour s'assurer de respecter les critères admissibles de vibration du conducteur, il a été décidé qu'une étude soit faite sur le conducteur pour connaître ses propriétés en fatigue, son amortissement interne et valider le système d'amortissement qui sera installé.

La limite d'endurance du conducteur dans le manchon d'ancrage a été déterminée en utilisant la norme CEI 62568 et en l'adaptant pour un cas où le conducteur est retenu par un manchon d'ancrage.

L'article présente le montage utilisé pour les essais de fatigue ainsi que les premiers résultats obtenus. Les essais ont été faits en contrôlant le déplacement relatif (Y_b) du conducteur à la sortie du manchon d'ancrage. Contrairement à un montage standard dans une pince de suspension, la fréquence fois le déplacement en ventre de vibration fY_{max} et le déplacement relatif Y_b du conducteur à la sortie du manchon d'ancrage ne sont pas directement proportionnel et dépendent du mode de vibration excité.

Des amortisseurs avec attache à tiges préformées seront utilisés pour maximiser la tolérance aux vibrations du conducteur dans l'attache de l'amortisseur et éviter tout problème de desserrement de boulon et de glissement de l'amortisseur sur le conducteur.

MOTS CLÉS

Limite d'endurance, fatigue, conducteur de traversée, AACSR, conducteur compact

INTRODUCTION

Le conducteur de la traversée du fleuve St-Laurent d'une ligne à 230 kV construite en 1958 sera remplacé sur le réseau de TransÉnergie pour assurer sa pérennité. La traversée est composée de trois conducteurs simples et il n'y a pas de câble de garde. La longueur de la traversée est de 1462 m et la longueur des portées adjacentes est de 337 m du côté nord-ouest et de 368 m du côté sud-est. Le terrain est relativement plat sur les deux rives du fleuve et les pylônes de suspension de la traversée ont une hauteur de 120 m alors que les pylônes d'ancrage adjacents ont une hauteur de 18 m.

Cette traversée limite aussi présentement la capacité de transit de la ligne. Pour remplacer le conducteur actuel, les ingénieurs de conception de ligne ont donc proposé d'utiliser un conducteur AACSR à fils trapézoïdaux (TRA3RTW8) pour augmenter la section d'aluminium du conducteur sans changer son diamètre externe. Cette solution permet d'augmenter la capacité de transit de la ligne sans augmenter les charges climatiques de glace et de vent. La Figure 1 montre la section du conducteur actuel (18/61, A1/S3A, charge de rupture nominale (CRN) = 598 kN, $m = 4,03$ kg/m) et celle du conducteur de remplacement TRA3RTW8 (A4/S3A, toronnage 30/37, CRN = 518 kN, $m = 3,7$ kg/m).

Le conducteur actuel est en ancrage aux pylônes de suspension à chaque extrémité de la traversée tel que montré à la Figure 2 et la même approche sera utilisée pour retenir le conducteur de remplacement. Le manchon d'ancrage du conducteur de remplacement est montré à la Figure 3 de même qu'une coupe du manchon comprimé sur le conducteur.

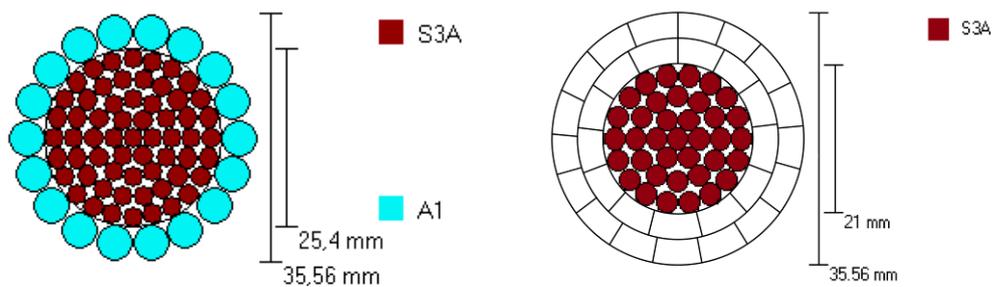


Figure 1: Conducteur actuel à gauche et conducteur de remplacement TRA3RTW8 à droite

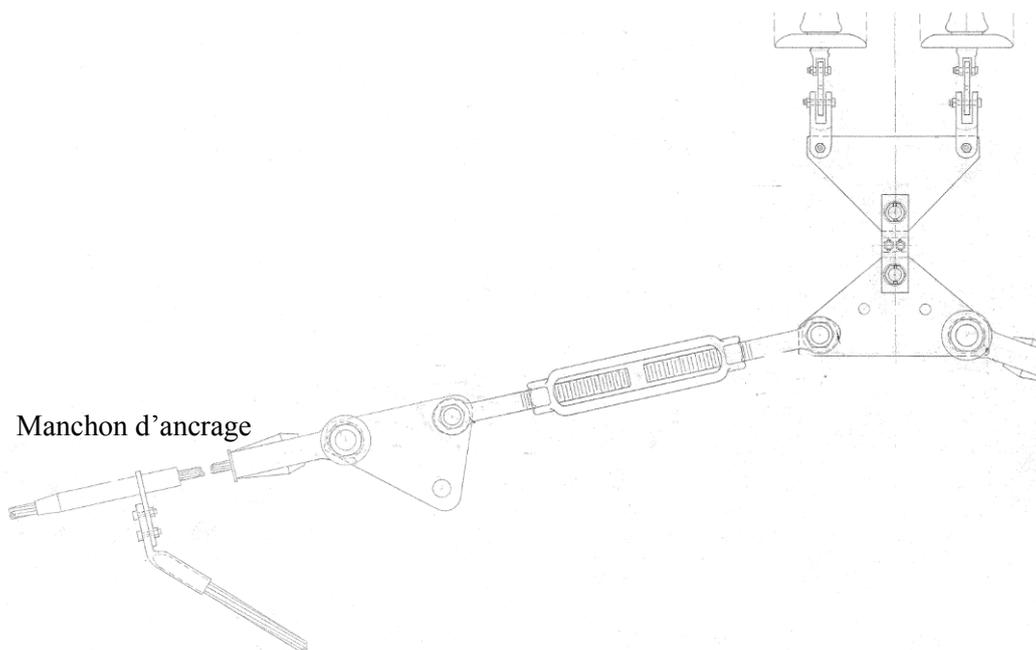


Figure 2: Ancrage du conducteur au pylône de suspension dans la traversée du fleuve actuelle

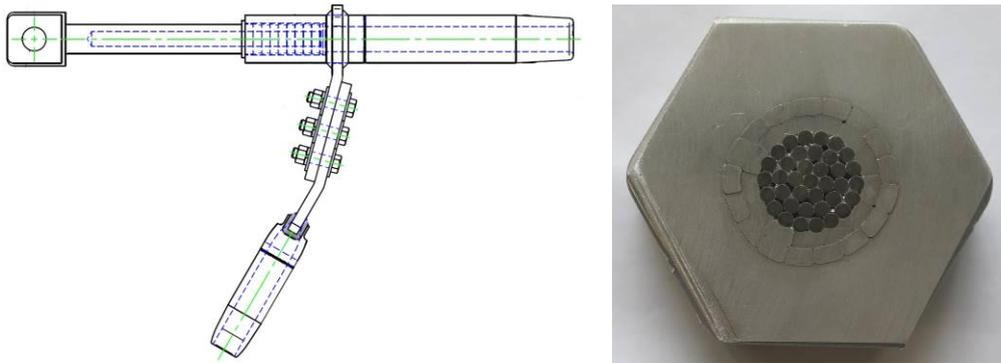


Figure 3: Manchon d’ancrage du conducteur TRA3RTW8 et coupe qui montre le manchon comprimé sur le conducteur

La tension mécanique du conducteur TRA3RTW8 sera très élevée, soit 230 kN, ce qui correspond à un paramètre de ligne H/w (tension mécanique sur le poids linéique du conducteur) de 6350 m. Cette tension est établie pour une température de -15°C qui est la température moyenne du mois de janvier à cet endroit. Un paramètre aussi élevé augmente la sévérité des vibrations éoliennes qui peuvent générer de la fatigue et le bris du conducteur puisqu’il dépasse de loin la tension sécuritaire recommandée par le CIGRÉ pour un conducteur simple avec amortisseurs [CIGRÉ TB 273, 2005]. Conséquemment, pour s’assurer de respecter les critères de vibration admissibles du conducteur, il a été décidé qu’une étude soit faite pour connaître ses propriétés en fatigue, son amortissement interne et valider le système d’amortissement qui sera installé.

La limite d’endurance en fatigue de ce conducteur AACSR doit être déterminée expérimentalement car la combinaison des caractéristiques suivantes font qu’il n’y a pas de données disponibles qui permettraient d’estimer la limite d’endurance du conducteur :

- Conducteur à fils d’alliage d’aluminium
- Conducteur à fils trapézoïdaux
- Conducteur retenu par un manchon d’ancrage plutôt que d’être soutenu dans une pince de suspension
- Paramètre H/w du conducteur très élevé de 6350 m

Les essais pour déterminer la limite d’endurance du conducteur TRA3RTW8 ont été faits en utilisant la norme CEI 62568 [2015] et en l’adaptant pour un cas où le conducteur est retenu par un manchon d’ancrage. La prochaine section présente le montage utilisé pour les essais de fatigue ainsi que les premiers résultats obtenus.

Des amortisseurs avec attache à tiges préformées seront utilisés pour maximiser la tolérance aux vibrations du conducteur dans l’attache de l’amortisseur et éviter tout problème de desserrement de boulon et de glissement de l’amortisseur sur le conducteur. La validation de l’efficacité du système d’amortissement sera publiée dans un article subséquent.

MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Bancs d’essai

La norme CEI 62568 [2015] a été écrite afin que les essais de fatigue sur les systèmes conducteur/pince spécifiques reproduisent aussi fidèlement que possible les conditions de charge sur le terrain. La norme précise donc que la pince doit être fixée pour empêcher tout mouvement et le banc d’essai doit reproduire l’angle de sortie du conducteur au niveau de la pince. L’Institut de recherche d’Hydro-Québec possède déjà six bancs d’essai qui ont été conçus en fonction de cette norme, cependant, pour cette étude, de nouveaux bancs ont dû être conçus car plutôt que d’être supporté dans

des pinces de suspension, le conducteur est retenu dans des manchons d'ancrage à chaque extrémité des portées. De plus, la tension mécanique du conducteur était trop élevée pour les bancs existants.

Quatre bancs d'essai ont été construits de cette façon. Pour chaque banc, le manchon est retenu par son œillet à une extrémité (Figure 4 et Figure 5) et le conducteur est excité avec un pot vibrant à l'autre extrémité (Figure 6). Les quatre bancs sont installés en série (Figure 7) et des encastremets ont été installés entre chaque banc pour minimiser l'amplitude des vibrations transmises entre les bancs.

La sévérité des vibrations est quantifiée à l'aide d'un capteur de déplacement relatif placé sur le manchon qui mesure le déplacement relatif du conducteur à 89 mm du dernier point de contact entre le conducteur et le manchon (Figure 4 et Figure 5).

La longueur de chaque banc d'essai mesurée entre l'œillet du manchon d'ancrage et l'encastrement situé à l'autre extrémité près du pot vibrant varie entre 12,06 et 12,77 m. Le conducteur TRA3RTW8 a été installé à une tension mécanique de 230 kN.



Figure 4: Manchon d'ancrage de la portée 1



Figure 5: Manchon d'ancrage de la portée 3



Figure 6: Portée d'essai 1



Figure 7: Vue des quatre portées d'essai

Déplacements relatifs en fonction du mode excité

Afin de minimiser la durée des essais, ceux-ci ont été faits au mode 6 qui est à une fréquence qui varie entre 59 et 60 Hz pour les différentes portées d'essai, où 60 Hz est la fréquence maximale permise pour ces essais selon la norme CEI 62568 [2015]. Pour ce mode, la longueur de boucle de la vibration stationnaire est de 2,12 m sauf la première boucle, où se trouve le manchon d'ancrage, qui a une longueur de 1,39 m. La distance entre le centre de l'œillet du manchon et l'autre extrémité du manchon où sort le conducteur est de 0,92 m, soit 66% de la longueur de la première boucle de vibration.

Pour les essais standards dans une pince fixe, le déplacement relatif Y_b à la sortie de la pince est proportionnel à la fréquence multipliée par l'amplitude au ventre du conducteur fY_{max} . Avec le montage utilisé ici, ce n'est plus le cas car le déplacement relatif sera influencé par la position du manchon d'ancrage dans la longueur d'onde excitée. Le déplacement relatif du conducteur à la sortie du manchon d'ancrage a été mesuré à différents modes de vibration des portées avant chaque essai en excitant le conducteur à une amplitude fY_{max} de 50 mm/s. Il est fourni à la Figure 8 pour les modes 1 à 10 pour l'essai 1 et pour les modes 4 à 6 pour les essais 2 à 5. On remarque que le déplacement relatif augmente graduellement jusqu'au mode 5 et diminue par la suite. Le déplacement relatif est donc maximum lorsque la sortie du manchon est située près du centre de la boucle de vibration. Les essais ont donc été faits en contrôlant le déplacement relatif (Y_b) du conducteur à la sortie du manchon d'ancrage.

Le déplacement relatif a été mesuré pour des amplitudes fY_{max} de 50, 100 et 150 mm/s au mode 6 pour deux essais différents. Pour un mode d'excitation donné, il n'y a pas de non linéarité en fonction de l'amplitude pour cette plage d'excitation et Y_b est directement proportionnel à fY_{max} tel que montré à la Figure 9.

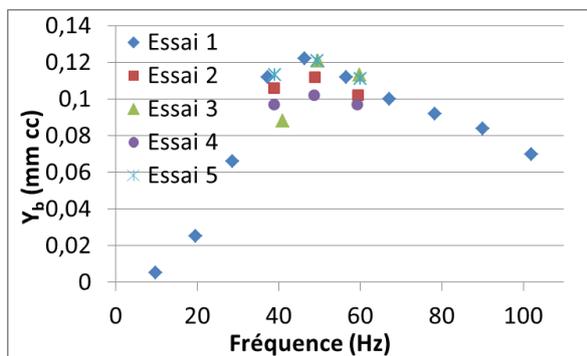


Figure 8: Déplacement relatif en fonction du mode excité

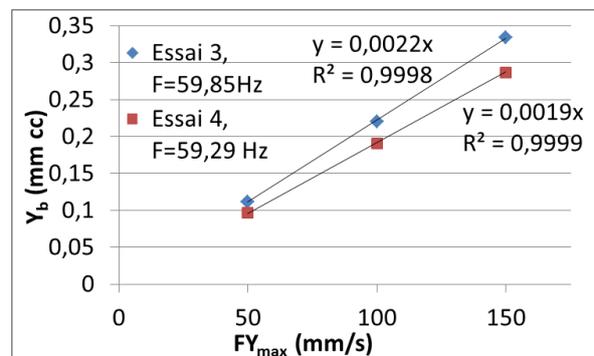


Figure 9: Déplacement relatif en fonction de l'amplitude FY_{max}

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Huit essais de fatigue ont été complétés jusqu'à présent sur le conducteur TRA3RTW8 avec les déplacements relatifs suivants : $Y_b = 0,6, 0,51, 0,4, 0,31, 0,205, 0,153, 0,151$ et $0,158$ mm cc. Les essais ont été arrêtés après trois bris sauf les essais avec $Y_b = 0,151$ et $0,205$ mm cc pour lesquels seulement deux bris ont été obtenus. Quatre essais sont en cours dont trois qui ont maintenant cumulés 138 Mcycles sans bris à une amplitude de $0,1$ mm cc ainsi qu'un essai à $0,125$ mm cc qui a cumulé 61 Mcycles sans bris. Le déplacement relatif Y_b du conducteur à la sortie du manchon, l'amplitude fY_{max} au ventre de vibration et les signaux de deux détecteurs de bris de fil du conducteur sont mesurés en continu pendant chaque essai.

La Figure 10 montre un exemple de bris de fils obtenus par fatigue par fretting sur la couche externe du conducteur pendant un essai. Le nombre de cycles avant bris (courbe SN) est illustré à la Figure 11 en termes de Y_b et à la Figure 12 en terme de $\sigma(Y_b)$ [EPRI, 2009] où ils sont comparés avec une combinaison des résultats obtenus précédemment au GREMCA [2002] et à l'IREQ [Paradis et Van Dyke, 2019] sur un conducteur standard ACSR Crow (ACSR 54/7) à une tension mécanique de 29 kN (25% CRN) dans une pince de type métal-métal (modèle Slacan 62065) (Figure 13). Bien qu'il manque encore des données pour établir la limite d'endurance du conducteur TRA3RTW8, il est clair que sa limite d'endurance sera beaucoup plus faible que celle d'un ACSR. Un tel résultat était anticipé car il est déjà connu que les trois facteurs suivants diminuent la limite d'endurance [EPRI, 2009]

- L'utilisation d'alliage d'aluminium

- Une tension mécanique très élevée
- L'utilisation d'un manchon d'ancrage qui a des angles de sortie plus sévères qu'une pince de suspension

Même si une diminution de la limite d'endurance était prévue, celle-ci est tout de même plus sévère que ce qui était anticipé. Le tableau 1 fournit le ratio du nombre de cycles avant rupture pour les deux conducteurs. Le nombre de cycles que le conducteur Crow peut cumuler avant bris par rapport à un TRA3RTW8 augmente lorsque l'amplitude diminue. Cependant, il est important de comprendre que même si la limite d'endurance exprimée en fonction de Y_b est beaucoup plus faible pour le TRA3RTW8 dans un manchon d'arrêt, cela ne signifie pas que le conducteur sera problématique. En effet, tel que montré plus haut dans cet article, le déplacement relatif est maximal lorsque l'extrémité du manchon est près du ventre de vibration alors que pour les autres fréquences, le déplacement relatif est moins sévère. Il faudra donc s'assurer que le système d'amortissement choisi protège adéquatement le conducteur sur toute la plage de fréquences d'intérêt et en particulier aux fréquences pour lesquelles l'extrémité du manchon est près du ventre de vibration.



Figure 10: Bris en fatigue par fretting de fils trapézoïdaux sur la couche externe du conducteur à la sortie du manchon d'ancrage

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

$\sigma_a(Y_b)$ (MPa)	Ratio entre les courbes S-N (Crow/TRA3RTW8)
20	6
13	59

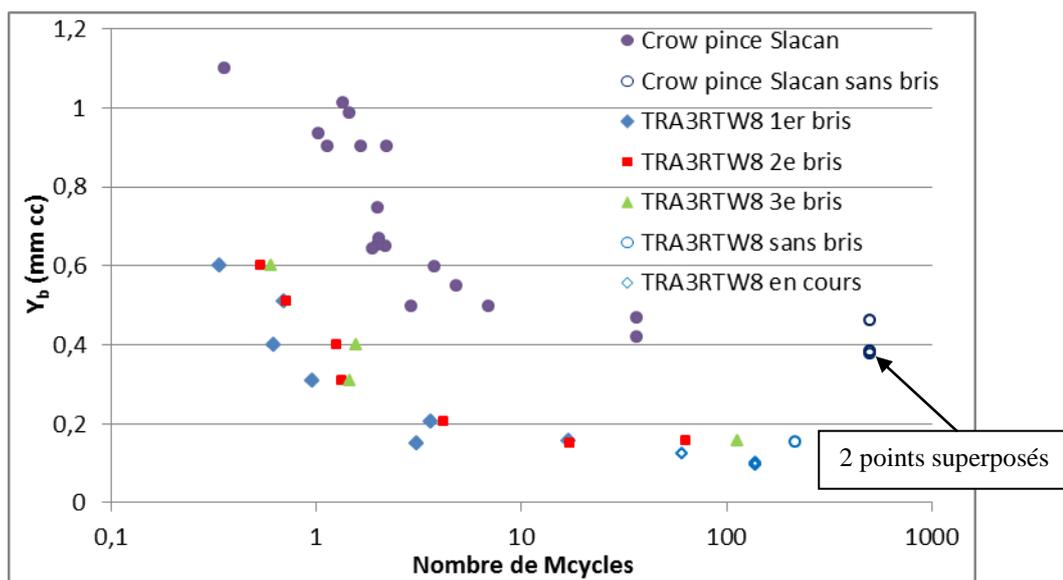


Figure 11: Comparaison du nombre de cycles avant la rupture pour le TRA3RTW8 et un conducteur Crow dans une pince métal-métal en fonction de Y_b

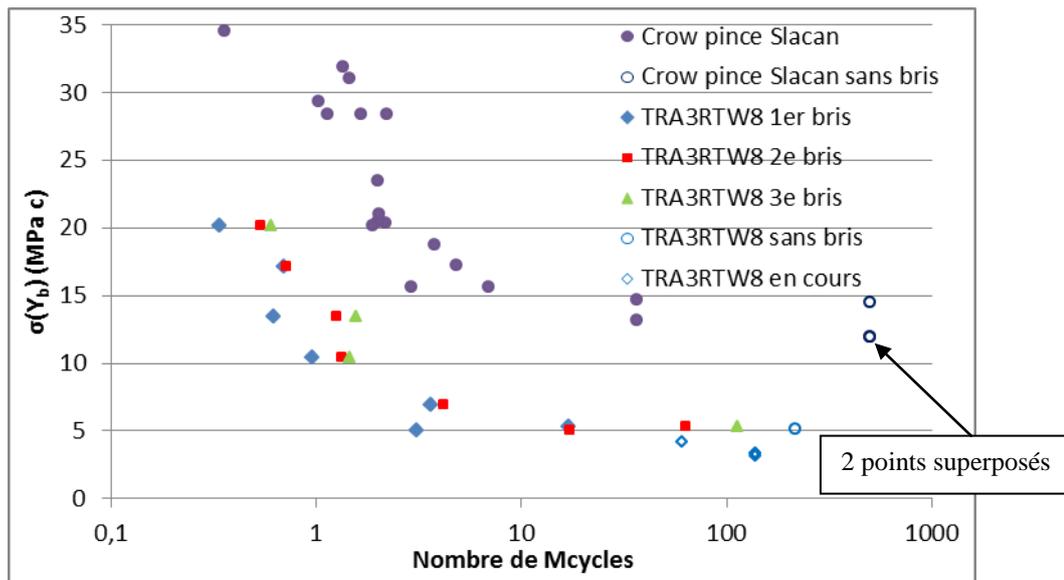


Figure 12: Comparaison du nombre de cycles avant la rupture pour le TRA3RTW8 et un conducteur Crow dans une pince métal-métal en fonction de $\sigma_a(Y_b)$

VALIDATION DU SYSTÈME D'AMORTISSEMENT

La validation du système d'amortissement se fera à l'automne 2019. Le conducteur TRA3RTW8 avec toute la quincaillerie d'ancrage incluant le manchon de l'extrémité de la traversée du fleuve sera installé sur une portée de laboratoire de 63,5 m (Figure 14). Le déplacement relatif du conducteur sera mesuré à la sortie du manchon d'ancrage et le déplacement relatif inverse aux pinces d'amortisseur afin de s'assurer que les amortisseurs dissipent suffisamment d'énergie pour que les amplitudes de vibration demeurent sous la limite d'endurance. La puissance dissipée sera mesurée par la technique de puissance et sera comparée à l'injection de puissance du vent calculée avec l'équation de la norme CEI 61897 [1998].



Figure 13: Conducteur Crow et pince de suspension métal-métal (Slacan 62065)



Figure 14: Portée de laboratoire de 63,5m

Des amortisseurs avec attache à tiges préformées plutôt que des pinces boulonnées seront utilisés pour éviter les bris par fatigue du conducteur à l'amortisseur car l'attache à tiges préformées est plus tolérante aux vibrations. Un essai de glissement de l'attache à tiges préformées sur le conducteur a été effectué pour s'assurer que l'amortisseur sera bien retenu sur le conducteur et ne migrera pas vers le point bas de la portée avec le temps.

CONCLUSION

L'article présente des résultats d'essais de fatigue sur un type de conducteur pour lequel aucune donnée n'est disponible, soit un conducteur AACSR pour une traversée du fleuve St-Laurent qui combine les caractéristiques suivantes :

- Enveloppe du conducteur avec fils d'alliage d'aluminium
- Enveloppe du conducteur avec fils trapézoïdaux
- Conducteur retenu par un manchon d'ancrage de part et d'autre de chaque pylône de suspension plutôt que d'être soutenu dans une pince de suspension
- Paramètre H/w du conducteur très élevé de 6350 m

Sur la base de huit essais de fatigue réalisés à des déplacements relatifs Y_b de 0,15 à 0,6 mm cc, il apparaît clairement que la limite d'endurance du conducteur TRA3RTW8 dans un manchon d'ancrage sera beaucoup plus faible que celle d'un ACSR dans une pince métal-métal standard. Des essais supplémentaires sont en cours à des amplitudes de 0,100 et 0,125 mm cc.

Pour un mode donné, le déplacement relatif Y_b est directement proportionnel à fY_{max} tel que montré pour des amplitudes de 50, 100 et 150 mm/s au mode 6 pour deux essais différents.

Pour un même fY_{max} au ventre de vibration, le déplacement relatif Y_b du conducteur à la sortie du manchon d'ancrage est maximal lorsque la sortie du manchon d'ancrage est près du ventre de vibration. Il faudra donc s'assurer que le système d'amortissement choisi protège adéquatement le conducteur sur toute la plage de fréquences d'intérêt et en particulier aux fréquences pour lesquelles l'extrémité du manchon est près du ventre de vibration.

BIBLIOGRAPHIE

CIGRE (2005). *Overhead conductor safe design tension with respect to aeolian vibrations*. Brochure technique CIGRE 273, 43 pages.

CEI 61897 Première édition (1998). *Lignes aériennes – Exigences et essais applicables aux amortisseurs de vibrations éoliennes Stockbridge*, 54 pages.

CEI 62568 Édition 1.0 (2015). *Lignes aériennes – Méthode d'essai de fatigue des conducteurs*, 38 pages.

EPRI (2009). *Transmission line reference book: Wind-induced conductor motion*, Deuxième édition. Electric power research institute (EPRI), Palo Alto, CA.

GREMCA (août 2002) Université Laval, Essais de fatigue du conducteur ACSR Crow avec amplitude variant selon une distribution de Rayleigh, Rapport No. SM-2002-07, Québec, Canada.

J. Paradis, P. Van Dyke (2019) *Amélioration de la durée de vie en fatigue du conducteur en utilisant une pince de suspension avec des élastomères coniques*, CIGRE Canada 2019, Montréal, Québec, Canada, 8 pages.