

Les oscillations sur les installations de transport à câbles

8^e partie

Oscillations dans les travées : lutte contre les causes ou réduction de l'intensité des oscillations



Dipl.-Ing. (EPFZ) Georg A. KOPANAKIS
Conseil en câbles et téléphériques

D^r Gabor KOVÁCS EMPA Dübendorf
Chef adjoint du département
"Matériaux et Ingénierie"



Dans le 8^e et dernier chapitre de notre série d'articles « Les oscillations sur les installations de transport à câbles », nous étudierons les moyens d'éviter ou de réduire les « oscillations liées au pompage » ainsi que les oscillations dans les travées dues à une influence extérieure.

MODIFICATION DE LA RÉPARTITION DE LA CHARGE EN LIGNE (OSCILLATIONS LIÉES AU POMPAGE)

Les mouvements transversaux rythmiques, normalement assez prolongés, qui caractérisent les oscillations liées au pompage ont pour effet de diminuer considérablement le confort d'une installation et peuvent même à la limite aboutir à un état d'exploita-

tion inadmissible en termes de sécurité. On s'efforce donc d'éviter ce genre de situation ou tout au moins d'en atténuer les conséquences. Différentes mesures permettent d'arriver à ce résultat ; ce sera de préférence au fabricant de l'installation ou bien à l'exploitant lui-même de les mettre en œuvre.

Le moyen le plus efficace et aussi le moins onéreux pour éviter tout au moins en partie ce type d'oscillations consiste à intervenir au stade de l'étude de l'installation. Il convient en effet avant tout de bien choisir l'emplacement des pylônes de manière à obtenir un transfert aperiodique de la charge résultant du passage des véhicules sur les pylônes dans chaque travée. On évite ainsi de provoquer dans la travée concernée une oscillation correspondant à la fréquence propre du système. Différents facteurs tels que vitesse de translation, espacement des véhicules sur le câble, tension du câble et masse totale, jouent évidemment un rôle important à cet égard.

Une fois l'installation construite et opérationnelle, ces paramètres clés sont pratiquement « gelés » dans la mesure où l'observation du règlement et l'obtention du débit en dépendent directement. Si toutefois l'exploitant peut s'accommoder d'une réduction du débit il est évidemment possible d'obtenir une importante réduction des oscillations liées au pompage en modifiant l'espacement des véhicules et/ou en modifiant en conséquence la vitesse de l'installation. La Fig. 1 (diagrammes 1a et 1b) montre comment la réduction de la vitesse d'exploitation se répercute sur le comportement oscillatoire de l'installation. (Remarque de la rédaction : Les diagrammes ont été fournis par le Dr Gabor Kovacs, ingénieur EPF Zurich, co-auteur de la partie de cette étude concernant les oscillations liées au pompage.)

Sur ces deux diagrammes, la modification de la masse dans une travée en fonction du temps est représentée de façon idéalisée par une onde carrée. La périodicité (largeur des rectangles) est une fonction directe de la vitesse de l'installation et de l'espacement entre les

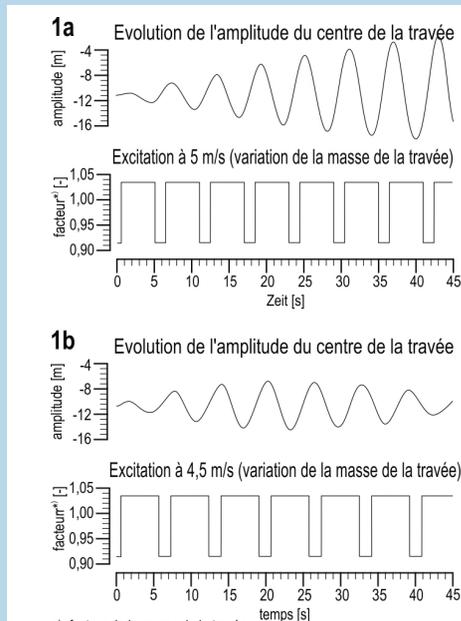


Fig. 1: Excitation de l'oscillation dans une travée par une modification périodique de la masse pour une vitesse $v = 5$ m/s (Fig. 1a) et pour une vitesse $v = 4,5$ m/s (Fig. 1b)

PHOTOS: J. NEJEZ

véhicules. On voit nettement que la largeur et l'espacement des rectangles se répercutent dans une large mesure sur l'excitation du champ. Pour une vitesse moins élevée (Fig. 1b) la période d'excitation est plus importante et donc le champ n'est plus excité selon sa fréquence propre (comme à la Fig. 1a) ; l'amplitude d'excitation est réduite, voire supprimée. On peut obtenir un effet similaire en augmentant l'espacement des véhicules. En ce cas, on pourra varier aléatoirement la valeur de l'espacement supplémentaire nécessaire pour limiter autant qu'il se peut la réduction de débit. Dans la grande majorité des cas, l'augmentation de la vitesse ou la réduction de l'espacement des véhicules ne sont pas des options envisageables, que ce soit en raison des règlements en vigueur ou des valeurs à ne pas dépasser concernant le dimensionnement des éléments de structure. Il peut évidemment être utile de combiner les mesures indiquées si ceci permet de minimiser la perte de débit. Enfin, outre l'option d'utiliser une méthode de calcul, l'exploitant a d'une façon générale la possibilité de rechercher expérimentalement la meilleure combinaison possible pour obtenir une réduction satisfaisante de l'oscillation liée au pompage, en variant de manière sélective les paramètres d'influence.

Très souvent, l'oscillation liée au pompage se répercute aussi sur la vitesse du câble (ou la modification de la force) dans les stations. La configuration de l'entraînement de même que celle du retour exercent une influence déterminante sur le comportement oscillatoire de l'ensemble de l'installation étant donné que le mouvement oscillatoire transversal des travées concernées se répercute sur le mouvement longitudinal du câble tout entier. On peut observer cet effet directement sur l'entraînement à partir de la consommation de courant, qui varie périodiquement. Et c'est précisément ce qui permet d'influencer activement l'oscillation liée au pompage à partir de la station, en réglant la vitesse de translation. Il est néanmoins vivement recommandé de n'effectuer l'adaptation du circuit de réglage que conjointement avec le fournisseur de l'appareillage électrique et le fabricant de téléphérique.

Sur la station de retour, on peut percevoir (aussi acoustiquement) ce mouvement longitudinal à partir des variations de la vitesse de rotation de la poulie. Le seul moyen d'intervenir sur ce mouvement oscillant est d'installer un dispositif supplémentaire qui minimise la déviation oscillante de la vitesse de rotation de la poulie. Une méthode consiste par exemple à adapter la masse d'inertie de la poulie pour modifier la fréquence propre critique de l'ensemble du système et par conséquent aussi celle des travées en oscillation. En cas de modification ultérieure, on pourra par exemple accoupler à la poulie une masse compensatrice à rotation rapide (avec engrenage intermédiaire de transmission). Il suffit alors d'une faible modification de la vitesse pour provoquer une accélération importante de la masse en rotation et donc pour obte-

nir un moment d'inertie additionnel de la masse, qui modifie de façon effective l'inertie de l'ensemble du système. Il importe néanmoins de penser au risque que peut comporter un freinage de sécurité avec une forte décélération (ceci renvoie au terme : accouplement à friction). A l'extrême, on pourrait envisager d'installer un système analogue sur les pylônes délimitant les travées concernées.

En conclusion, il faut donc bien admettre qu'une fois l'installation réalisée les possibilités dont on dispose pour atténuer les oscillations liées au pompage sont extrêmement limitées. La solution idéale consiste bien évidemment à tenir compte de ce problème potentiel lors de l'étude du projet et de la conception des structures. Si ce n'a pas été le cas et que l'on doit intervenir ultérieurement sur le plan technique, il faudra généralement s'accommoder d'une réduction du débit. En fait, si la méthode envisagée ne pose pas de problèmes concernant la sécurité et si la perte de débit n'est pas trop conséquente, cette variante sera certainement la solution la plus avantageuse en termes de coûts.

INFLUENCES D'ORIGINE EXTÉRIEURE

Chute d'objets : Lorsque la cause de l'excitation est un événement non répétitif, il est clair que l'on fera le nécessaire pour éviter l'« excitation » ; en l'occurrence, on aménagera le tracé de manière à ce que l'appareil et en particulier le câble ne puissent pas être touchés par exemple par la chute d'un arbre.

Des essais réalisés aux Etats-Unis en 1990 ont montré que lorsque de gros arbres tombent sur des câbles « peu tendus », qui ne représentent donc qu'une charge relativement faible pour le pylône, la chute de ces arbres imprime aux câbles de fortes oscillations avec risque de déraillement. En revanche, si seul le sommet de l'arbre touche le câble et que ce dernier soit bien tendu, il n'y aura pas de conséquence notable pour l'installation (à part le fait qu'il faille éventuellement remettre en état la surface du câble), l'arbre glissant simplement le long du câble. (On trouve un article sur ce sujet dans le N° 89/août 1992 de la revue de l'Association suisse du Personnel technique des Téléphériques. Cet article sur le comportement d'un télésiège dans des situations extrêmes décrit des expériences grandeur nature effectuées sur le télésiège Eskimo, à Winterpark, CO (USA) les 18 et 19 juin 1990, avec un commentaire de G. A. Kopanakis.) L'essentiel est évidemment d'éviter le risque de chute d'objets sur le tracé d'une installation tout au moins pendant les heures d'ouverture.

Influence du vent – d'une façon générale : La force horizontale due à l'action du vent qui est supposée s'exercer sur le câble en raison de la résistance de l'air est indiquée dans les normes et les règlements et a été par conséquent prise en compte dans les calculs lors de l'étude du projet. La seule chose que puisse faire l'exploitant pour réduire l'effet du vent est de veiller à ce que le givre ne vienne pas augmenter de façon sen-

sible la section métallique effective : il pourra éviter un givrage excessif, et donc l'augmentation de la section du câble, en faisant tourner fréquemment l'installation en dehors des heures d'ouverture (cf. aussi ISR 3/2013, « Délestage »).

Influence du vent – Tourbillons de Karman : Les tourbillons de Karman se forment lorsqu'un corps se trouve sur le trajet de l'écoulement d'un fluide à condition que le corps considéré ait une section circulaire. Les tourbillons de Karman peuvent alors amener le corps cylindrique à osciller transversalement au sens d'écoulement. La fréquence des oscillations transversales ainsi provoquées se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$f = S_r \cdot \frac{v}{d}$$

f : fréquence [Hz]

S_r : « nombre de Strouhal » (0,2 env. pour un cylindre)

v : vitesse [m/s]

d : diamètre [m]

Si l'on considère les câbles toronnés monocouche fréquemment utilisés sur les installations de transport à câbles, il est clair que l'on n'a pas affaire ici à une section circulaire (Cf. ISR 1/2008, p. 22, « Wie rund sind Litzenseile », Prof. Dr. J. Nejez). On aurait donc tendance à conclure que le problème des tourbillons de Karman ne se pose pas sur les installations de transport à câbles ; or ceci est faux dans la mesure où les câbles hélicoïdaux entièrement clos, en particulier les câbles neufs sur lesquels il n'y a pas de dépôts de lubrifiants et de poussière, présentent une section circulaire pratiquement idéale et sont donc parfaitement sujets aux oscillations transversales provoquées par les tourbillons de Karman : si un vent persistant souffle dans une direction constante à une vitesse constante, par suite de quoi la fréquence de l'oscillation de Karman est du même ordre que la fréquence des harmoniques de champ possibles, une oscillation (onde stationnaire) sera imprimée au câble porteur ; elle est généralement perçue grâce au bruit sourd qu'elle produit (« bourdonnement du câble porteur »).

On peut d'une façon générale éviter la formation de tourbillons de Karman en s'attaquant à la cause, à savoir en « perturbant » la « circularité » de la section, p.ex. à l'aide d'un élément hélicoïdal que l'on adapte sur la surface cylindrique. Un exemple bien connu dans la vie quotidienne est la surface hélicoïdale des antennes fouets d'autoradios (Fig. 2).

Cependant on ne saurait avoir recours à cette méthode dans le cas des câbles porteurs, la « circularité » de la section d'un tel câble étant une des qualités essentielles que l'on s'efforce d'obtenir ; par ailleurs le câble porteur est soumis en permanence au passage des galets.

On peut remédier à cette situation en essayant d'amortir les oscillations, comme on le fait dans le cas des oscillations du câbles tracteur apparaissant sur les téléphériques à va-et-vient bicâbles lors du passage sur les pylônes (Voir ISR 3/2013, p. 73, Fig. 2).

Une autre méthode possible est celle utilisée pour amortir des oscillations comparables sur les lignes électriques aériennes pour lesquelles on utilise un « amortisseur Stockbridge ». L'amortisseur Stockbridge (Fig. 3a) consiste en un court morceau de câble (S) muni d'une masse à chaque extrémité (E1 et E2), que l'on fixe au câble près de l'extrémité de la travée (pylône ou station) (Fig. 3b). L'oscillation du câble imprime un mouvement à l'ensemble de l'amortisseur ; les masses qui alourdissent les extrémités sont ainsi mises en mouvement et forcent le court morceau de câble dont elles sont solidaires à décrire une flexion alternée. L'énergie dont le système oscillant aurait besoin pour surmonter la friction interne du câble est ainsi soustraite et dissipée dans l'environnement en tant que chaleur de friction.

Dans un cas comme dans l'autre, on doit faire bien attention à ce que les amortisseurs ne modifient pas le gabarit d'encombrement de l'installation. On laissera donc toujours au constructeur le soin de prévoir et installer ce type d'amortisseurs.

Ajoutons que l'on peut supprimer la cause du débattement transversal d'une cabine à section circulaire provoqué par les tourbillons de Karman sur un téléphérique monocâble unidirectionnel en « perturbant » la « circularité » de la section de la cabine par ajout de baguettes verticales sur la carrosserie.



Fig. 2 : Antenne fouet d'autoradio

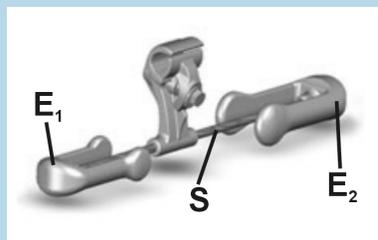


Fig. 3a : L'amortisseur Stockbridge tel qu'on l'utilise sur une ligne électrique aérienne

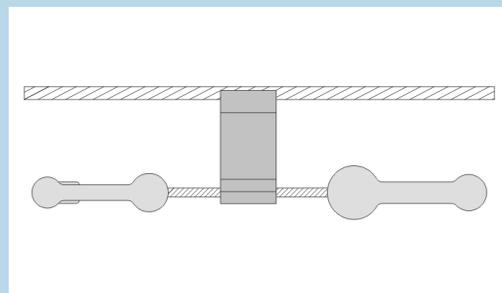


Fig. 3b : Amortisseur fixé parallèlement au câble

Influence du vent – Galop : Le galop, en revanche, ne se produit que lorsqu'on a un profil de section oblongue ; condition qui ne se trouve réalisée sur les câbles que lorsqu'ils sont recouverts de givre. On a donc ici deux possibilités pour intervenir au niveau de la cause : soit au moment de l'étude du projet en choisissant – dans la mesure où ceci est possible – un emplacement où la probabilité de formation de givre est réduite, soit, une fois que l'exploitation est opérationnelle, en la faisant tourner suffisamment souvent en dehors des heures normales d'ouverture pour éviter la formation de quantités excessives de givre (voir aussi « Influence du vent – d'une façon générale »).

Arrivés à la fin de cette série d'articles consacrés aux « Oscillations sur les installations de transport à câbles », tous les auteurs tiennent à adresser leurs vifs remerciements au P^f Gabor Oplatka qui, tout au long des années 80 et 90, alors qu'il était directeur de la section

Technique des transports par câbles de l'Institut pour la construction légère et la technique des installations de transport par câbles de l'EPF de Zurich, a poursuivi inlassablement les travaux de recherche relatifs aux oscillations sur les installations de transport par câbles entrepris initialement par son prédécesseur, le P^f Otto Zweifel. Le P^f Oplatka a non seulement imprimé sa marque à ces recherches mais il a aussi su communiquer à ses assistants toute la fascination exercée par ce sujet.

Les auteurs veulent également dire un grand et cordial merci au P^f Josef Nejez qui a revu avec la plus grande attention tous les articles présentés et auquel ils sont reconnaissants pour ses critiques, pour les passionnantes discussions qui en ont résulté et pour son soutien hautement compétent tant sur le plan technique que sur celui de la rédaction.

Georg A. Kopanakis, Gabor Kovács

Sotchi 2013

MANIFESTATION XII^e Forum international d'investissement

La XII^e Forum international d'investissement s'est tenu à Sotchi du 26 au 29 septembre 2013 – directement au Parc Olympique dans le vaste palais de glace « Bolchoï Ice Dom ».

Le nombre des participants à ce Forum augmente d'année en année. Alors que quelque 500 délégués avaient pris part au I^{er} Forum international économique « Sotchi 2002 », 7300 participants venus de 37 régions de Russie et 40 pays, dont 480 visiteurs étrangers, s'étaient donné rendez-vous à cette manifestation en 2012. Le Forum de Sotchi se présente en effet

comme une occasion unique d'échange de vues personnel entre dirigeants politiques, diplomates, industriels ou hommes d'affaires venant d'Europe, du Proche-Orient, d'Asie, d'Amérique et de Russie.

L'objectif du Forum international de Sotchi est de permettre aux entreprises de différents pays et régions d'unir leurs efforts en vue d'une évolution économique positive de la Russie.

Les projets proposés sont soigneusement préparés, coordonnés et présentés avec toute la documentation nécessaire. Après avoir accepté de collaborer à un projet en signant un accord lors du Forum, l'investisseur peut déjà commencer au bout de deux à trois semaines à travailler à sa réalisation.

L'administration de la région de Krasnodar s'efforce de faire bénéficier tous les secteurs des investissements, avec une priorité pour le développement des transports, des stations climatiques et du tourisme, de l'industrie de transformation et de la construction de machines agricoles. En s'engageant sur la voie du développement durable de tous les secteurs économiques, l'expérience de la Région de Krasnodar peut ainsi servir aujourd'hui de modèle pour l'ensemble de l'économie russe.

ISR était pour la sixième fois partenaire média officiel du Forum de Sotchi, une occasion d'offrir une plate-forme publicitaire hautement exclusive à l'ensemble des industries liées au tourisme d'hiver.

PHOTOS: C. AMTMANN

