

# Torsion des câbles de téléphérique

Jacques DUBUISSON

Docteur de l'Institut national polytechnique de Grenoble

Service technique des remontées mécaniques

## RÉSUMÉ

Le Service technique des remontées mécaniques assure, depuis 1987, un programme d'études et de recherches des phénomènes de torsion des câbles de téléphérique pour lequel une importante machine d'essais a été réalisée.

L'étude de l'équilibre en moment d'une portée de câble entre deux appuis montre que des déformations en rotation et en allongement sont associées au moment de torsion constant du câble.

Les études expérimentales et théoriques des contraintes des fils des câbles tracteurs des cabines de téléphériques montrent que des contraintes de flexion et de cisaillement, associées à la torsion du câble, s'ajoutent à la contrainte de traction habituellement prise en compte.

La résistance au glissement des attaches des véhicules des télésièges et des télécabines sur le câble porteur-tracteur s'oppose au poids du véhicule et au moment de torsion du câble. Une méthode de calcul du moment de torsion du câble porteur-tracteur et sa validation expérimentale sont en cours de réalisation.

**MOTS CLÉS :** Câbles - Torsion - Traction - Fil - Contrainte - Pylône - Moment (mec.) - Équipement - Résistance au glissement - TAD = téléphérique.

## Introduction

Les câbles tracteurs des cabines des téléphériques et les câbles porteurs-tracteurs des télésièges et des télécabines sont composés de six torons de plusieurs dizaines de fils reposant sur une âme centrale.

Ces câbles utilisés sur de grandes dénivellations sont soumis à des phénomènes de tension parfaitement connus depuis environ trente-cinq années [1] et des phénomènes de torsion, étudiés principalement en Autriche et en Suisse [2].

Le Service technique des remontées mécaniques assure, depuis 1987, un programme d'études et de recherches des phénomènes de traction et de torsion des câbles de téléphérique, pour lequel une importante machine d'essais a été réalisée [3].

Après une description succincte des câbles de téléphérique et une présentation de l'étude de l'équilibre mécanique en traction et torsion d'une portée de câble, deux études en cours sont exposées.

L'une concerne les contraintes des fils associées à la torsion des câbles tracteurs des cabines des téléphériques, l'autre concerne le moment de torsion des câbles porteurs-tracteurs qui, en plus du poids du véhicule, sollicite la résistance au glissement des attaches des véhicules des télésièges et des télécabines.

## Description et comportement mécanique des câbles de téléphérique

Autour d'une âme centrale, sont enroulés six torons préformés sous la forme d'une hélice circulaire droite caractérisée par son pas de câblage.

Les torons sont composés d'une à quatre couches de fils préformés et enroulés autour d'un fil d'âme sous la forme d'une hélice circulaire droite caractérisée par son pas de toronnage.

En règle générale, les câbles de téléphérique sont de type parallèle ou Lang, c'est-à-dire que le signe de l'angle de câblage est identique au signe de l'angle de toronnage.

Un exemple d'une section transversale d'un câble est représenté sur la figure 1.

L'âme en matériau synthétique est soit câblée à partir de très nombreuses fibrilles, soit constituée d'un seul cylindre homogène et compact.

Les fils sont en acier, dont la résistance à la rupture peut varier entre 1 420 et 1 960 MPa et l'allongement à la rupture de 1,9 à 1 %. Leurs diamètres vont de 1 à 3 millimètres.

Compte-tenu de sa structure en hélice, un élément de câble, tendu entre deux points de fixation où sa rotation est empêchée, développe un moment de torsion interne  $M$  proportionnel à la tension  $S$  [4].

$$M = C_s \cdot d \cdot S \quad (1)$$

où :

$C_s$  est le coefficient constant associé à la tension,  $d$  est le diamètre du câble.

À tension nulle, ce moment de torsion interne peut être augmenté ou diminué par l'action d'un moment supplémentaire extérieur  $M_c$ , associé à la rotation  $\varphi_s$  d'une des extrémités de l'élément de câble [4].

$$M_c = \bar{C}_\theta \cdot G \cdot d^4 \cdot \frac{\varphi_s}{l_s}$$

où :

$\bar{C}_\theta$  est le coefficient constant associé au vrillage ou au dévrillage,

$G$  est le module de cisaillement du matériau des fils du câble,

$l_s$  est la longueur de l'élément de câble.

Pour une tension et une rotation données, le moment de torsion interne est une combinaison non linéaire des effets de la tension  $S$  et de la rotation  $\varphi_s$  d'une des extrémités de l'élément de câble [4].

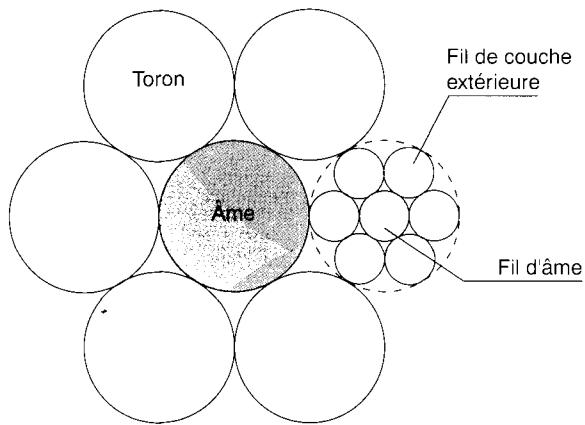


Fig. 1 - Section transversale d'un câble de 6 torons à 7 fils.

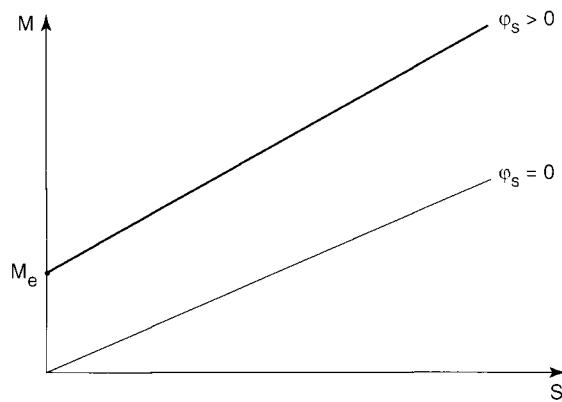


Fig. 2 - Schématisation du comportement d'un élément de câble en traction et en torsion.

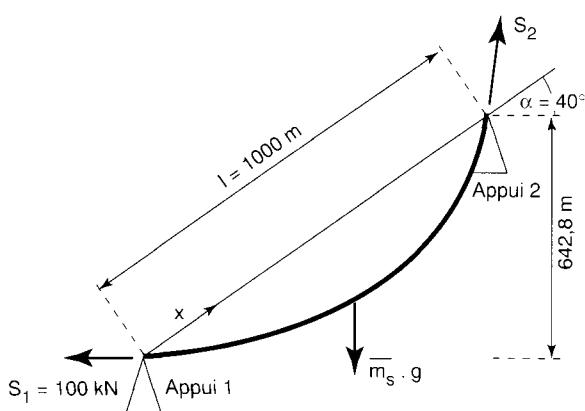


Fig. 3 - Schématisation d'une portée de câble entre deux appuis.

$$M = C_s \cdot d \cdot S + C_s \cdot d \cdot \frac{\lambda_0}{2\pi} \cdot S \cdot \frac{\phi_s}{l_s} + \bar{C}_\theta \cdot G \cdot d^4 \cdot \frac{\phi_s}{l_s}$$

où :

$\lambda_0$  est la longueur du pas de l'hélice des fils extérieurs des torons du câble à l'état initial.

Le comportement d'un élément de câble en traction et en torsion, à l'état initial où  $\phi_s = 0$  et à l'état vrillé où  $\phi_s > 0$ , est schématisé sur la figure 2.

## Équilibre d'une portée de câble entre deux appuis

Considérons la portée de câble schématisée sur la figure 3.

### Équation d'équilibre en tension

Le fondement physique de cet équilibre est très connu [1] et l'équation correspondante ne nécessite aucune présentation particulière.

$$S_2 = S_1 + q \cdot x \quad \text{avec} \quad q = \bar{m}_s \cdot g \cdot \sin \alpha$$

où :

$S_1$  est la tension du câble à l'appui 1,  
 $S_2$  est la tension du câble à l'appui 2,  
 $x$  est l'abscisse suivant la corde,  
 $\bar{m}_s$  est la masse linéique du câble,  
 $g$  est l'accélération de la pesanteur,  
 $\alpha$  est la pente de la corde par rapport à l'horizontale.

### Équation d'équilibre en moment

La tension du câble à l'appui amont  $S_2$  est supérieure à la tension du câble à l'appui aval  $S_1$ . Compte-tenu de ce que la rotation du câble est empêchée aux deux appuis, suivant l'équation (1) le moment appliqué au câble à l'appui amont est supérieur au moment appliqué au câble à l'appui aval et l'équation d'équilibre en moment n'est pas satisfaite.

Elle ne peut l'être que si l'on admet la possibilité d'une déformation en rotation de la section du câble  $\phi$  et d'une déformation du pas de câblage, variables en fonction de l'abscisse  $x$  [5].

$$\phi = 1 \cdot \frac{\pi}{\lambda_0} \cdot H \cdot \frac{x}{l} \cdot (1 - \frac{x}{l}) \quad \text{avec} \quad H = \frac{q \cdot l}{S^* + S_1} \quad \text{et}$$

$$S^* = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{\bar{C}_\theta}{C_s} \cdot G \cdot d^3$$

Le moment appliqué au câble à l'appui amont est alors égal au moment appliqué au câble à l'appui

aval et égal à  $M$ . L'équation d'équilibre en moment est satisfaite.

$$M = C_s \cdot d \cdot \left[ S_1 + \frac{q \cdot l}{2} \right] \quad (2)$$

### Application numérique

Considérons le cas d'un câble à six torons de 17 fils pour lequel  $d = 40,45$  mm, le pas de câblage de 283,1 mm, l'angle de câblage de  $16,86^\circ$ ,  $\lambda_0 = 209,91$  mm,  $\bar{m}_s = 5,46$  kg/m,  $C_s = 0,1265$ ,  $\bar{C}_\theta = 5 \times 10^{-4}$ .

$$q = \bar{m}_s \cdot g \cdot \sin \alpha = 34,42 \text{ N/m}$$

$$S^* = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{\bar{C}_\theta}{C_s} \cdot G \cdot d^3 = 602,937 \text{ kN}$$

$$\text{avec } G = 7,7 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$H = \frac{q \cdot l}{S^* + S_1} = 0,048966$$

$$\phi_1 = \frac{\pi \cdot l \cdot H}{4 \cdot \lambda_0} = 183,21 \text{ rd ou } 29,16 \text{ tours.}$$

La rotation  $\phi$  de la section du câble, représentée sur la figure 4, est une courbe du second degré en fonction de l'abscisse  $x$  : elle est nulle aux appuis 1 et 2 et égale à 29,16 tours à la distance de 500 mètres.

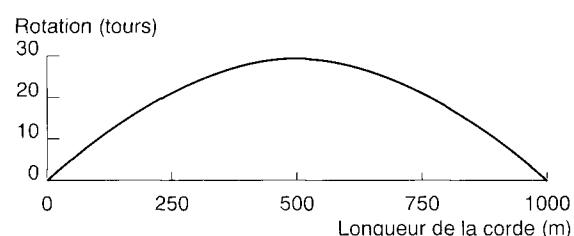


Fig. 4 - Représentation de la rotation  $\phi$  de la section du câble.

En conséquence, le pas de câblage s'allonge de 3,4 % à l'appui amont, se raccourcit de 3,4 % à l'appui aval et reste inchangé à la distance de 500 mètres.

### Contraintes dans les fils des câbles

Des mesures de l'effort de traction, du moment de torsion, de l'allongement et du diamètre du câble sont effectuées. Les contraintes des fils sont mesurées par des rosettes d'extensométrie électrique à trois jauge de déformation.

Les études théoriques sont réalisées au moyen d'un logiciel de calcul issu d'une adaptation d'un modèle mathématique aux caractéristiques potentielles importantes (comportement mécanique de l'âme, du frottement entre les fils, com-

portement linéaire et non-linéaire du câble) et dont les applications sont très nombreuses (flexion sur poulie, tension impulsionale en industrie du levage, calcul en fatigue, etc.) [6].

Dans ce modèle, chacun des fils du câble est une hélice circulaire droite. Un schéma de déformation, établi dans le cadre des petites déformations linéaires, permet le calcul des variations de courbure et de torsion de chaque fil en fonction de l'allongement et de la rotation imposés au câble.

Chacun des fils est soumis à un torseur d'effort interne et externe. Les équations d'équilibre et les lois de la résistance des matériaux permettent le calcul des éléments non nuls des torseurs représentés sur la figure 5 dans le repère  $\vec{n}, \vec{b}, \vec{t}$  lié à l'élément du fil.

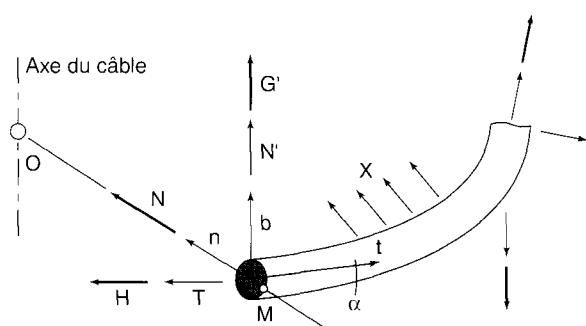


Fig. 5 - Éléments non nuls des torseurs appliqués à un élément de fil.

Chacun des fils est notamment soumis à un effort de traction  $T$ , un effort linéique de contact de la couche interne –  $X$ , un moment de flexion  $G'$  et un moment de torsion  $H$ .

Au point  $M$  de tangence de la section circulaire de rayon  $R$  du fil de la couche extérieure d'un toron et du cercle circonscrit au câble de rayon  $OM$ , le champ de contrainte  $\Gamma_M$  dans le repère  $\vec{t}, \vec{b}$ , est plan.

$$\Gamma_M = \begin{bmatrix} \frac{T}{\pi R_2} + \frac{4G'}{\pi R_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2H}{\pi R_3} + \frac{4N'}{3\pi R_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les études expérimentales et théoriques sont achevées sur des torons simples à une et deux couches de fils et sont en cours sur un câble Lang de diamètre 40,5 millimètres, composé de six torons de 17 fils.

Les études expérimentales ont validé la possibilité de simulation mathématique du comportement en traction et torsion des torons. Une interrogation demeure quant à l'effet du frottement entre les fils sur la valeur de la contrainte de cisaillement des fils des câbles et des compléments d'études sont d'ores et déjà programmés.

Ces études montrent que :

– En absence de torsion, la contrainte longitudinale de traction des fils associée à l'allongement du câble est la seule significative.

– En cas de vrillage du câble et de diminution du pas de câblage, une contrainte longitudinale de flexion des fils se cumule à celle associée à l'allongement du câble. Il s'y rajoute une contrainte de cisaillement issue de la torsion de chacun des fils.

Cette superposition de contraintes majore fortement la contrainte longitudinale de traction associée à l'allongement du câble.

– En cas de dévrillage du câble et d'augmentation du pas de câblage, les fils de la couche extérieure des torons sont mis en compression.

Pour des dévrillages importants, il arrive que la couche extérieure des fils des torons ne soit plus en contact de la couche intérieure et que la valeur de la contrainte de plasticité, équivalente aux contraintes de compression longitudinale et de cisaillement, soit atteinte.

Les fils de la couche extérieure des torons restent alors décollés du cylindre circonscrit au câble et forment une structure particulière appelée « cage d'oiseau » [6].

## Résistance des attaches des véhicules, des télésièges et des télécabines

Les mors des attaches des véhicules, des télésièges et des télécabines sont serrés sur le câble au moyen de ressorts. La résistance au glissement de l'attache, associée à l'effort de serrage des mors, s'oppose au poids du véhicule et aux moments de torsion des deux portées de câble à l'amont et à l'aval de l'attache.

Aussi pour un effort de serrage donné, le moment de torsion de l'attache, égal à la différence des moments de torsion des deux portées de câble à l'amont et à l'aval de l'attache, réduit la valeur maximale de la masse du véhicule transporté dans les conditions de sécurité au glissement imposées.

Le moment de torsion de l'attache dépend des moments de torsion imposés au câble par les pylônes et des moments de torsion associés à la tension des câbles à l'amont et à l'aval de l'attache.

Les moments de torsion imposés au câble par les pylônes mettent en jeux des phénomènes de frottement influencés, de manière aléatoire, par de nombreux paramètres : charge des véhicules, équipement des balanciers des pylônes, conditions de température et d'hydrométrie, etc.

Les moments de torsion associés à la tension des câbles ont été modélisés mathématiquement [5] en fonction de la position de l'attache dans les portées entre les pylônes, qui varie en fonction du temps.

Le principe de cette modélisation mathématique peut être présenté simplement dans l'exemple de la portée schématisée sur la figure 6, à l'instant  $t_{-1}$  où le véhicule -1 a terminé de franchir le pylône  $P_1$ .

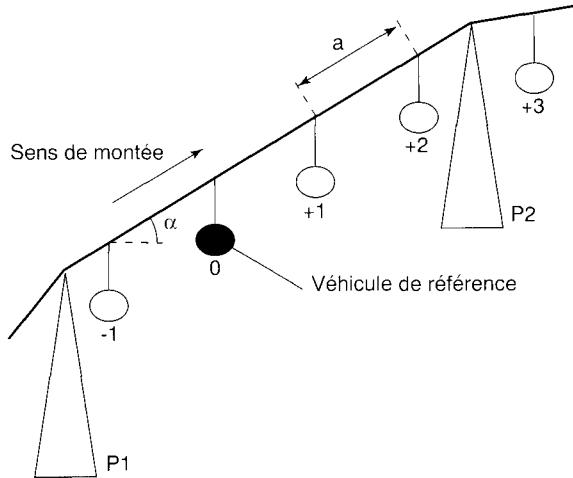


Fig. 6 - Schématisation d'une portée de câble, avec quatre véhicules, entre deux pylônes.

Le moment de torsion  $M_{inf}$  dans la travée de câble entre le véhicule -1 et le véhicule de référence 0 est suivant l'équation (2) constant.

$$M_{inf} = C_s \cdot d \cdot \left[ S_1 + \frac{q \cdot a}{2} \right] \text{ avec } q = \bar{m}_s \cdot g \cdot \sin \alpha$$

où :

- $C_s$  est le coefficient constant associé à la tension,
- $d$  est le diamètre du câble,
- $S_1$  est la tension du câble à l'amont du véhicule -1,
- $\bar{m}_s$  est la masse linéique du câble,
- $g$  est l'accélération de la pesanteur,
- $\alpha$  est la pente de la corde par rapport à l'horizontale,
- $a$  est la distance entre les cabines.

Le moment de torsion  $M_{sup}$  dans la travée de câble entre le véhicule de référence 0 et le véhicule +1 est, suivant l'équation (2), constant.

$$M_{sup} = C_s \cdot d \cdot \left[ (S_1 + q \cdot a + P_f) + \frac{q \cdot a}{2} \right]$$

avec :

$$P_f = m_f \cdot g \cdot \sin \alpha$$

où :

$m_f$  est la masse du véhicule de référence 0.

Le moment de torsion  $M_{att}$  de l'attache du véhicule de référence 0, associé au couple de rappel de la masse du véhicule écarté de la verticale, est la différence des moments  $M_{sup}$  et  $M_{inf}$ .

Dans l'exemple de la portée schématisée sur la figure 6, on peut remarquer que le moment de torsion  $M_{att}$  de l'attache est constant entre l'instant  $t_{-1}$  et l'instant  $t_{+1}$  où le véhicule +1 s'apprête à franchir le pylône  $P_2$ .

$$M_{att} = M_{sup} - M_{inf} = C_s \cdot d \cdot [P_f + q \cdot a]$$

Le moment de torsion  $M_{att}$  de l'attache est proportionnel à la valeur du coefficient  $C_s$ , au diamètre  $d$  et à la masse linéique  $\bar{m}_s$  du câble, à la masse  $m_f$  et à la distance  $a$  des véhicules ainsi qu'à la pente  $\alpha$  de la corde par rapport à l'horizontale.

Une étude expérimentale est en cours pour la mesure du moment de torsion des attaches de dix télésièges et télécabines, complétant des résultats de mesures antérieures sur quelques télésièges.

Les objectifs de cette étude sont de confirmer les ordres de grandeur des moments de torsion des attaches des télécabines performantes, de valider la modélisation mathématique du moment de torsion des attaches dans les portées et de définir une valeur approchée statistique du moment de torsion imposé aux câbles par les pylônes.

Le but ultime de ces études est d'aboutir à une méthode de calcul fiable du moment de torsion des attaches, en fonction du temps, prenant en compte les valeurs approchées statistiques des moments de torsion imposés au câble par les pylônes et les moments de torsion associés à la tension des câbles.

Deux capteurs de mesure du moment de torsion des câbles, à l'aval et à l'amont de l'attache, ont été développés en collaboration avec le Centre technique des industries mécaniques de Saint-Étienne.

Les moments de torsion des câbles sont mesurés en continu tout au long de la ligne, sans démontage des capteurs de mesure au passage des pylônes.

Trois allers et retours sont effectués afin de rendre compte des éventuelles variations dans le temps du moment de torsion du câble sur les pylônes.

Six mesures ont été réalisées sur un télésiège et cinq télécabines.

Ces études montrent que :

- le moment de torsion des attaches des télécabines performantes, en condition d'exploitation nominale, atteint une valeur de 280 N.m, alors qu'il n'est que de 50 à 80 N.m pour les télésièges traditionnels.

La valeur de 80 N.m confirme les valeurs de 50 N.m des mesures antérieures réalisées sur quelques télésièges ;

— la modélisation mathématique [5] de l'évolution du moment de torsion des câbles et des attaches dans les portées, entre chacun des pylônes, est d'ores et déjà validée expérimentalement. Le moment de torsion de l'attache est proportionnel à la valeur du coefficient de torsion du câble, au diamètre et à la masse linéique du câble, à la masse et à la distance des véhicules ainsi qu'à la pente de la corde par rapport à l'horizontale.

## Conclusion

De la même façon que pour les câbles employés dans les mines [7] ou dans l'industrie de l'Offshore [8], les câbles de téléphérique utilisés sur de grandes dénivellations sont sujets à des phénomènes de torsion.

Les phénomènes de torsion des câbles de téléphérique sont étudiés depuis 1987 au Service technique des remontées mécaniques, d'un point de vue théorique et expérimental, au moyen d'une importante machine d'essai [3].

La torsion des câbles tracteurs des cabines de téléphériques modifie notablement la valeur de la seule contrainte de traction prise en compte habituellement.

Un dévrillage important peut avoir pour conséquence la mise en compression des fils extérieurs et leur décollement de la structure du câble. Un câble tracteur a été ainsi rendu impropre à l'utilisation après quelques semaines d'exploitation du téléphérique.

Un vrillage important peut modifier la durée de vie en fatigue des câbles tracteurs notamment à proximité de leurs points de fixation [9].

L'attache des véhicules des télésièges et des télécabines oppose une résistance au poids du véhicule et au moment de torsion du câble porteur-tracteur.

Des capteurs de mesure du moment de torsion du câble porteur-tracteur ont été développés et des mesures ont été engagées sur dix télésièges et télécabines.

Des valeurs de 280 N.m du moment de torsion du câble ont été relevées sur des télécabines performantes dont la résistance au glissement des attaches était ainsi réduite d'environ 20 %.

La modélisation mathématique [5] de l'évolution du moment de torsion du câble dans les portées, entre chacun des pylônes, est d'ores et déjà validée expérimentalement.

L'analyse statistique des moments de torsion imposés au câble par les pylônes devrait permettre d'aboutir à une méthode de calcul fiable du moment de torsion des attaches.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LEHANNEUR L. (1962-1963), *Conférences sur les téléphériques à voyageurs*, École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [2] ENGEL E. (1959), *Phénomène de torsion dans les câbles de téléphériques*, Zeitschrift der Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, 6, pp. 215-220.
- [3] DUBUISSON J. et autres (1987), *Tenue des attaches des véhicules des installations monocâbles*. Présentation d'une plate-forme d'essais de glissement et étude statique préalable. Internationale Seilbahn-Rundschau, pp. 292-298.
- [4] KOLLROS W. (1974). *Zusammenhang zwischen Torsionsmoment, Zugkraft und Verdrillung in Seilen*. Internationale Seilbahn-Rundschau, pp. 49-58.
- [5] GASSMANN H.R. (1981), *Torsionsmomente in Förderseilen von Umlaufbahnen*. Mitteilungen aus dem Institut für Bau und Transportmaschinen, ETH, Zürich, VDI - Z - Reihe 13 Nr 19.
- [6] COSTELLO G.A. (1997), *Theory of Wire Rope*, Mechanical Engineering Series, Springer.
- [7] REBEL G., CHANDLER H.D., ODN H.D. - 0619 (1997), A machine for the tension-torsion testing of steel wire rope. OIPEEC, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 71, pp. 55-74.
- [8] CHAPLIN C.R. (1998), Torsion problems caused by wire during mooring installation operations in deep water, OIPEEC, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 75, pp. 47-60.
- [9] OPLATKA G., ROTH M. (1996), *Choix du pas de câblage des câbles tracteurs d'appareils à va-et-vient surmontant une forte dénivellation*, Internationale Seilbahn-Rundschau, pp. 4-9.

## ABSTRACT

### Torsion in cable lift cable

J. DUBUISSON

Since 1987 the Service Technique des Remontées Mécaniques has been conducting a programme of research into torsion in cable lift cables. A large testing machine has been constructed for this programme.

An investigation of the equilibrium of moments of a cable span between two supports shows that torsion and longitudinal strain are linked with the constant torsional moment of the cable.

Experimental and theoretical studies of the stresses in the wires of the cabin hauling cables show that the bending and shearing stresses, related to twisting of the cable, add to the tensile stress which is usually considered.

The sliding resistance of the fastenings of chairs and cabins to the carrying-hauling cable opposes the weight of the chairs and cabins and the torsional moment of the cable. A method for calculating the torsional moment in the carrying-hauling cable and checking the result experimentally is in the process of being developed.