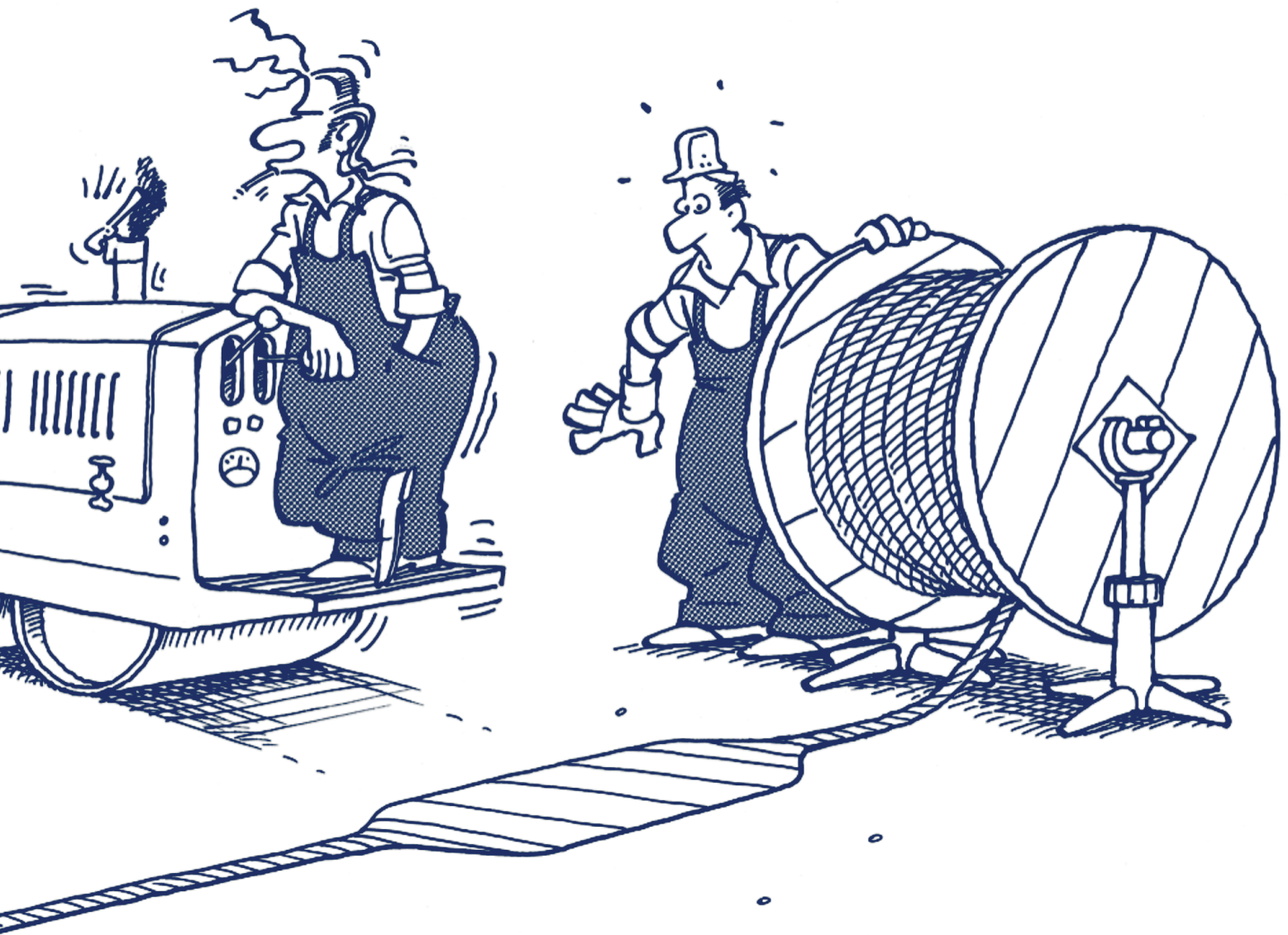


WIRE ROPE

TECHNOLOGY AACHEN



Câbles métalliques pour appareils de levage
Problèmes et Solutions

Câbles métalliques pour appareils de levage

Problèmes et Solutions

par Dipl.-Ing. Roland Verreet et Jean-Marc Teissier

Table des matières

1. Le câble métallique – un élément multiredondant.....	4
2. Problème: Concentration locale de fils cassés.....	6
3. Problème: Rupture de fils internes	7
4. Problème: Ruptures de fils internes dans un câble antigiratoire conventionnel ..	10
5. Le contrôle électromagnétique des câbles.....	15
6. Problème: La corrosion des câbles métalliques.....	16
7. Problème: Durée de vie en fatigue non satisfaisante.....	17
8. Problème: Torons détendus et “cages à oiseaux”	24
9. Problème: Ecrasement sur le tambour	30
10. Problème: Les bons câbles sont chers.....	34

© 2002, 2004, 2012, 2020 Ingenieurbüro für Drahtseiltechnik Wire Rope Technology Aachen GmbH

Titre et dessins animés: Rolf Bunse

Composition, mise en page et design: Benedikt Dolzer, Aachen

Réimpression, même partielle, uniquement avec l'autorisation de l'auteur.

1. Le câble métallique – un élément multi redondant

Imaginons la situation suivante: un contrôleur a examiné le câble de levage d'une grue et a trouvé 10.000 fils cassés. Il insiste sur le fait que, selon les normes, le câble est toujours en bon état. Cela peut-il être vrai ?

Avant l'invention du câble métallique en 1834, les chaînes représentaient le plus courant moyen de levage. Elles ont cependant un inconvénient majeur: les chaînes sont un agencement linéaire d'éléments supportant la charge. Si seulement un seul maillon se rompt, tout le système s'écroule (Fig. 1).

Au contraire, les câbles métalliques mettent en parallèle des éléments de reprise de charge. Si un élément se rompt, la charge de rupture du câble ne sera réduite que localement, d'une valeur en général inférieure à 1% (Fig. 2).

Les câbles métalliques sont des systèmes multi redondants. Dans un système redondant chaque élément indispensable pour le fonctionnement de l'ensemble existe au moins en double. Par exemple, certaines parties du corps humain sont redondantes: si l'on perd la vue sur un œil, on est encore capable de voir, si l'on perd l'audition sur une oreille on est encore capable d'entendre. Si dans un câble un fil se rompt, il en reste encore environ 250 autres pour porter la charge.

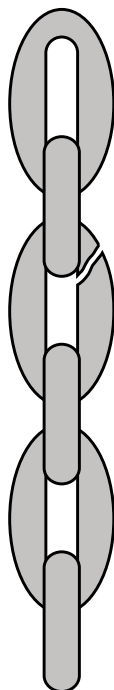


Fig. 1: La chaîne. La rupture d'un élément conduit à la défaillance de tout le système.



Fig. 2: Le câble métallique. La rupture d'un élément n'a presque aucun effet.

Mais que se passera-t-il si durant son service de plus en plus de fils du câble se rompent ? Si nous perdons la vue sur les deux yeux, nous ne sommes plus capables de voir. Si nous perdons l'audition sur les deux oreilles nous ne sommes plus capables d'entendre. En conséquence, le câble ne devrait-il pas se rompre si chacun de ses 250 fils est cassé ?

Non, cela paraît incroyable, mais même si chacun des fils est cassé 200 fois, le câble peut encore être en bon état.

La Fig. 3 schématise les 250 fils constituant un câble (seulement 30 fils sont représentés pour des raisons de place). Chacun des 250 fils est cassé une fois dans la longueur du câble. Chaque rupture de fil ne représente cependant qu'une légère diminution locale de la charge de rupture du câble. Quelques millimètres au-delà de la zone de rupture, le fil cassé supportera de nouveau toute sa part de la charge.

Supposons une répartition de fils cassés le long du câble uniforme au point que chaque petit morceau de câble ne comporte pas plus d'un fil cassé. La charge de rupture de chacun de ces morceaux de câble sera alors seulement réduite de moins de 1%. Lors d'un essai de traction ce câble pourrait bien supporter une charge de rupture égale à celle du catalogue pour un câble neuf, bien que chacun de ses éléments constitutifs soit cassé !

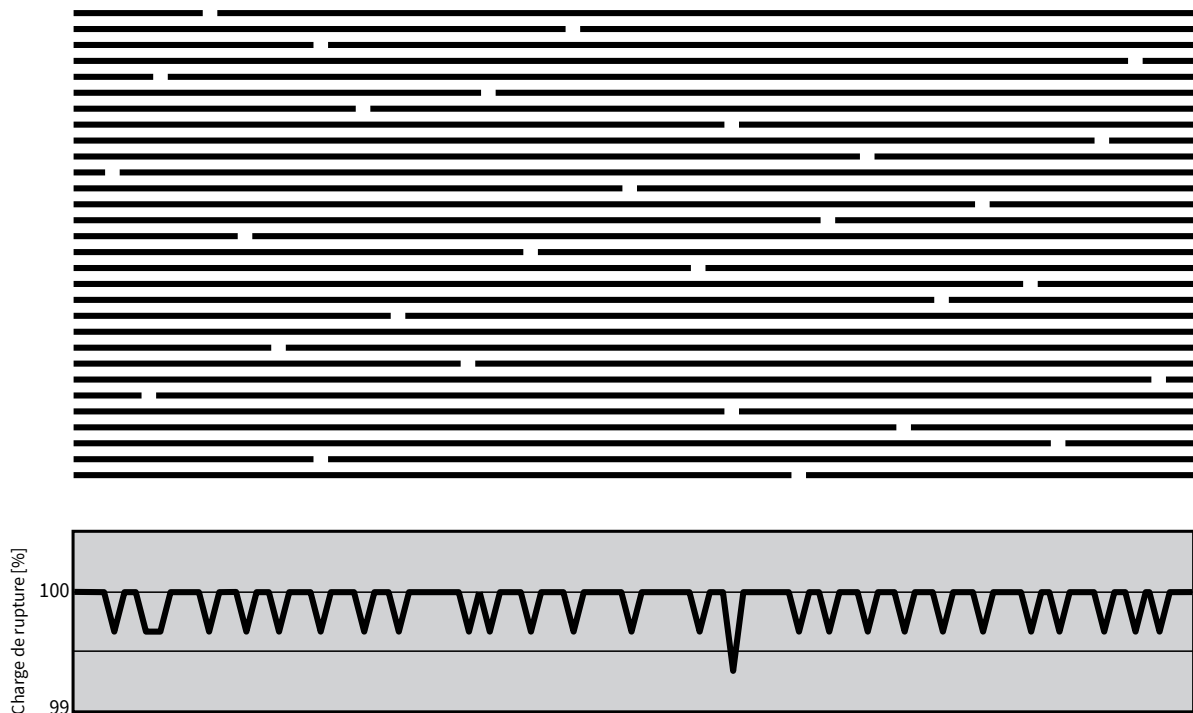


Fig. 3: Chaque rupture de fil ne conduit qu'à une diminution locale de la charge de rupture du câble.

Il devrait tout de même exister des règles qui indiquent le nombre de fils cassés admissible par unité de longueur de câble. Le nombre critique de fils cassés est défini, dans les normes nationales ou internationales ainsi que dans les règles des sociétés de classification, comme étant le nombre de fils cassés visibles sur une longueur définie comme étant un multiple du diamètre du câble. Selon la norme ISO 4309, cette unité de longueur est soit 6 fois le diamètre du câble (environ un pas de câblage), soit 30 fois le diamètre du câble (environ cinq pas de câblage).

Notre contrôleur a trouvé 10.000 fils cassés, mais le critère de dépose n'a été atteint sur aucune longueur de câble de $6 \cdot d$ ou de $30 \cdot d$. Il avait donc parfaitement raison de maintenir le câble en service.

Cet exemple montre qu'un câble est un composant fiable et sûr.

2. Problème: Concentration locale de fils cassés

Quelques jours plus tard, notre contrôleur rentre après avoir examiné le câble de levage d'une seconde grue du même type que la première. Il n'a trouvé que 15 fils cassés, mais il exige la dépose du câble.

Une telle attitude paraît étrange pour une personne qui avait admis 10.000 fils cassés sur la première grue. Le contrôleur a-t-il cette fois tort ?

Parfois les fils cassés sont concentrés sur une petite longueur de câble (Fig. 4), par exemple à cause d'une mauvaise utilisation ou à cause d'une agression mécanique locale. Dans ce cas les diminutions de charge de rupture s'additionnent jusqu'à atteindre une valeur critique, le câble doit donc être déposé.

Bien que 500 m de câble soient encore comme neufs, le câble doit être déposé parce que seulement 5 cm sont dans un mauvais état.

Les câbles avec des concentrations locales de fils cassés sont dangereux. Notre contrôleur a donc raison d'exiger la dépose du câble.

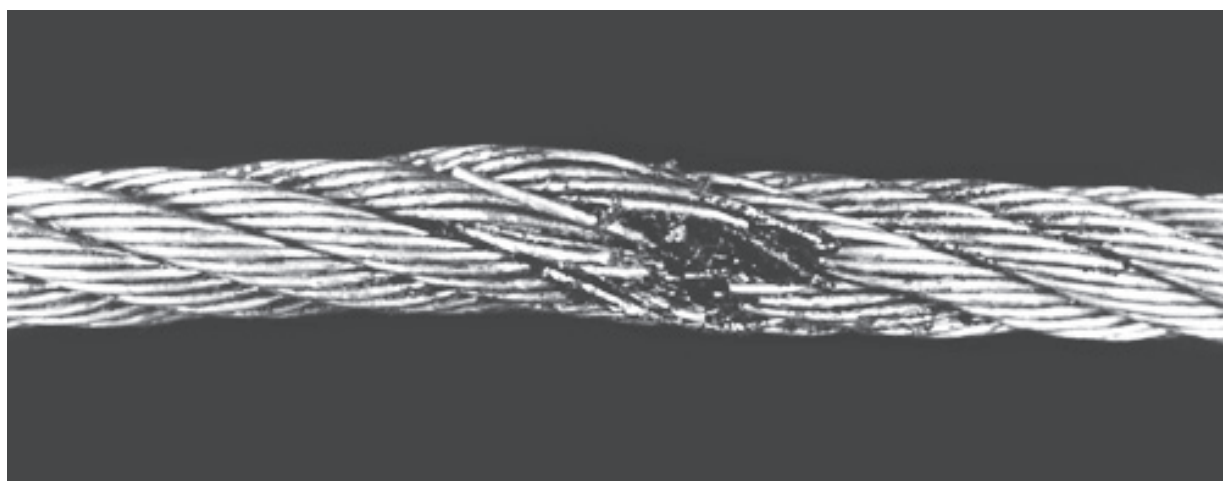


Fig. 4: Une concentration locale de ruptures de fils.

3. Problème: Rupture de fils internes

Le câble de levage d'une troisième grue de même conception ne montre aucun fil cassé. Après avoir examiné le câble, notre contrôleur exige sa dépose. Pourquoi ?

Lors d'une inspection visuelle d'un câble, seulement l'état des parties visibles des fils extérieurs peut être évalué. La section métallique des fils extérieurs ne représente cependant qu'environ 40% de la section métallique du câble et seulement environ la moitié de la longueur de ces fils est visible (Fig. 5). Cela signifie que lors d'une inspection visuelle un contrôleur peut examiner seulement 20% de la section métallique du câble. Il peut seulement espérer que les 80% restant soient dans un état au moins aussi bon.

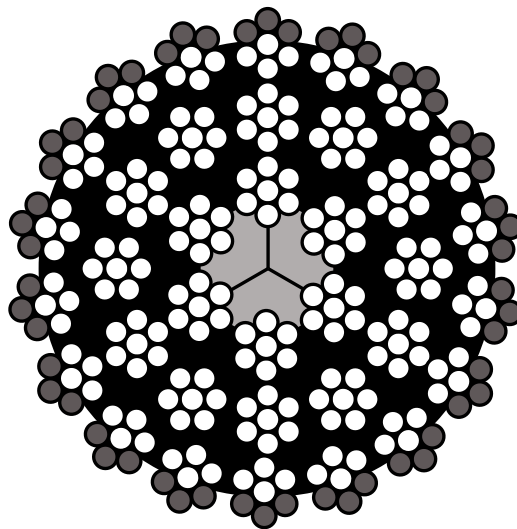


Fig. 5: Seulement 20% de la section métallique du câble peut être inspectée visuellement.

Inspection visuelle d'un câble = 20% Certitude + 80% Espoir

Il n'est cependant pas rare que les 20% visibles de la section métallique soient en bon état, alors qu'un grand nombre de ruptures de fils est caché dans la partie non visible du câble. Les câbles avec des ruptures de fils internes et aucun signe extérieur d'endommagement sont extrêmement dangereux.

3.1. Problème: Ruptures de fils internes dans un câble 6 torons sur âme métallique

Lors de l'examen d'un câble Warrington-Seale 6 x 36 avec âme métallique (Fig. 7) aucune rupture de fil extérieur n'a été détectée. Après avoir plié manuellement le câble, il est apparu évident que chaque fil extérieur était cassé à l'intérieur du câble (Fig. 6).

Les conditions de contact entre l'âme métallique et les torons extérieurs se caractérisent par de très fortes pressions de contact (Fig. 9). En conséquence les fils extérieurs du câble peuvent casser au niveau de leur point de contact avec l'âme métallique. La longueur libre des fils cassés de la Fig. 6 montre clairement que c'était le cas pour ce câble.

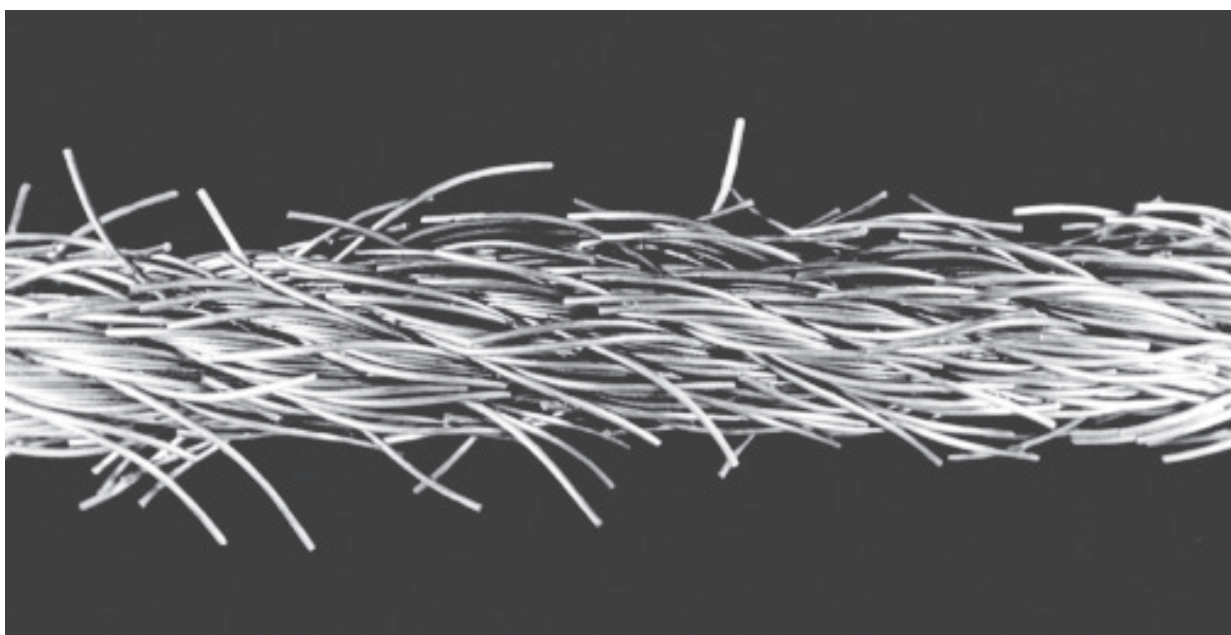


Fig. 6: De nombreuses ruptures de fils aux points de contact entre l'âme métallique et les torons extérieurs.

3.2. Solution: Câbles plastifiés 8 torons

La Fig. 8 montre la section d'un câble 8 torons avec une couche plastifiée entre l'âme métallique et les torons extérieurs. La couche plastifiée ne se contente pas seulement d'enfermer le lubrifiant dans l'âme et de protéger l'âme contre les agressions de la corrosion. Elle empêche également le contact métal-métal entre les deux couches de torons et ainsi réduit les pressions au niveau des contacts entre l'âme métallique et les torons extérieurs (Fig. 10). Ainsi la couche plastifiée aide à prévenir la rupture des fils à l'intérieur du câble.

.

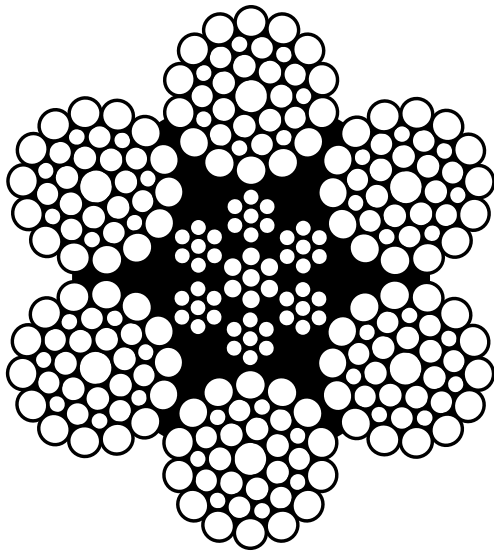


Fig. 7: Câble avec âme métallique (6 x 36 WS avec âme métallique)

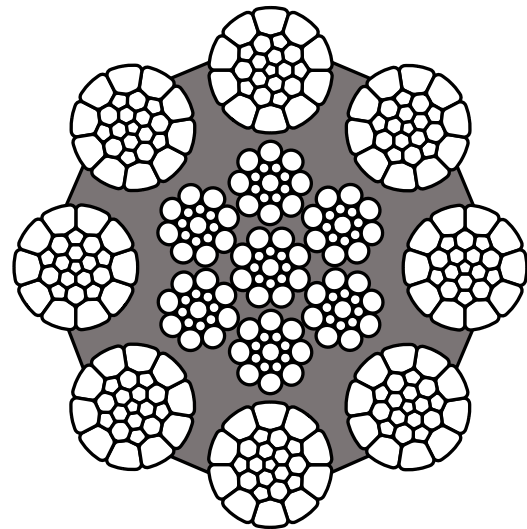


Fig. 8: Câble 8 torons avec une couche plastifiée entre l'âme métallique et les torons extérieurs



Fig. 9: Très forte pression de contact entre l'âme métallique et les torons extérieurs (6 x 36 WS à âme métallique)



Fig. 10: La couche plastifiée agit comme coussin. Elle réduit les pressions de contact entre l'âme métallique et les torons extérieurs et aide à prévenir les ruptures de fils à l'intérieur du câble

4. Problème: Ruptures de fils internes dans un câble antigiratoire conventionnel

Dans les câbles antigiratoires, les torons extérieurs sont câblés en sens inverse des torons de l'âme. C'est pourquoi les câbles antigiratoires sont encore plus propices aux ruptures internes de fils que les câbles 6 et 8 torons. La Fig. 14 montre la section d'un câble antigiratoire 36 x 7.

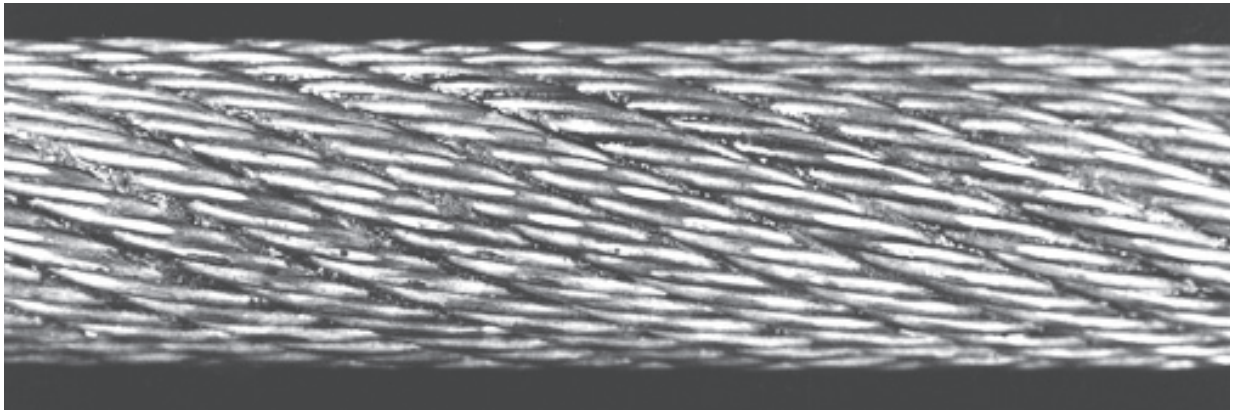


Fig. 11: Câble 36 x 7 après quelques mois de service. Le câble ne montre aucune rupture de fils.

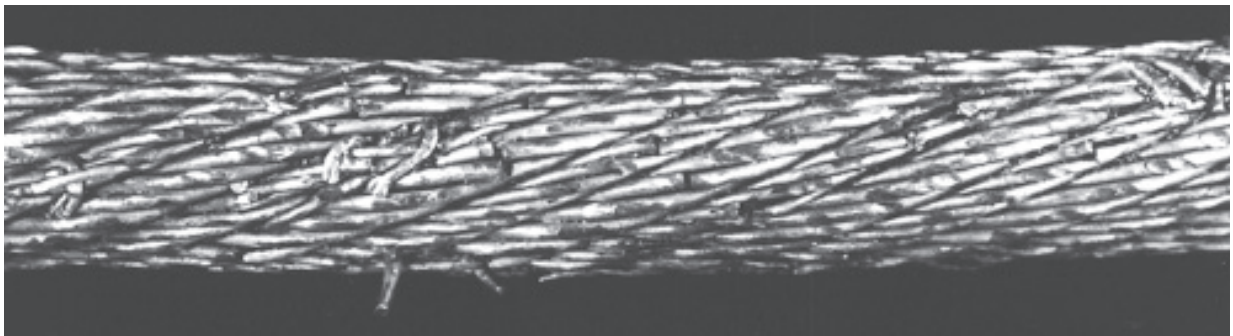


Fig. 12: Le démontage des torons extérieurs fait apparaître de nombreuses ruptures de fils sur l'âme métallique au niveau des points de contact entre les deux couches de torons.

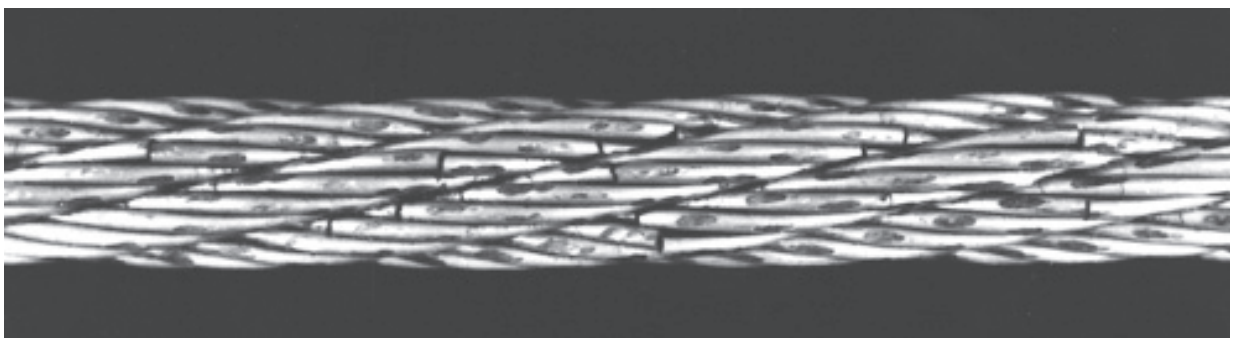


Fig. 13: Le démontage de la seconde couche de torons met également en évidence une forte concentration de fils cassés sur la couche inférieure.

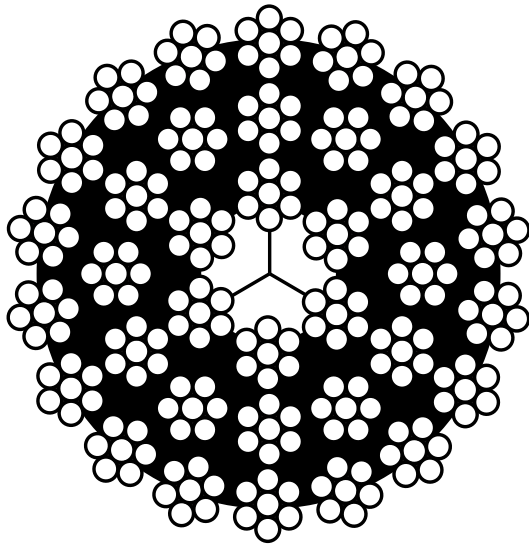


Fig. 14: Câble antigiratoire (36 x 7)

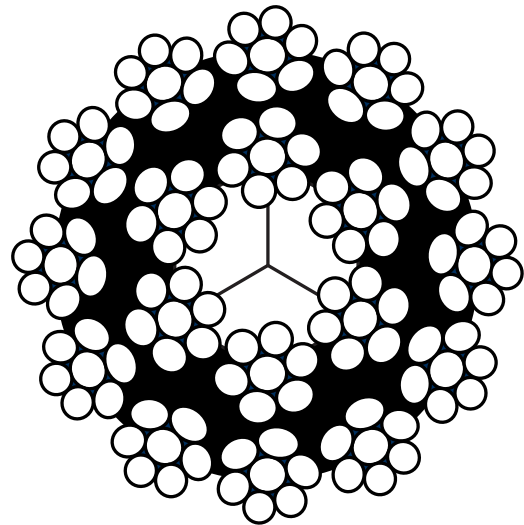


Fig. 15: Câble semi-antigiratoire (18 x 7)

La Fig. 11 montre la surface externe d'un tel câble après quelques mois de service. Aucun fil cassé n'est visible à l'extérieur.

Le démontage des torons extérieurs fait apparaître de nombreuses ruptures de fils sur l'âme métallique au niveau des points de contact entre les deux couches de torons (Fig. 12). Le démontage de la seconde couche de torons met également en évidence une forte concentration de fils cassés sur la couche inférieure (Fig. 13).

4.1. Intermezzo: Câble antigiratoire

Si vous utilisez un câble 18 x 7 (Fig. 15), un câble 18 x 19 ou une de leurs variantes avec torons compactés sur votre grue, ne le dites pas à votre compagnie d'assurance ! Ces câbles ont un défaut de conception, comme cela est mis en évidence dans l'exemple suivant:

Deux équipes essaient de pousser un tourniquet dans des directions opposées. La compétition n'est pas très équitable puisque l'équipe qui actionne le tourniquet à l'extrémité de ses bras bénéficie d'un bras de levier considérablement plus long que l'autre équipe qui pousse près du centre (Fig. 16).

Si l'équipe qui pousse près du centre n'a pas une seule chance quand le nombre d'équipiers est le même dans les deux camps, qu'en sera-t-il s'ils sont deux fois moins nombreux que ceux qui poussent à l'extrémité des bras (Fig. 17)?

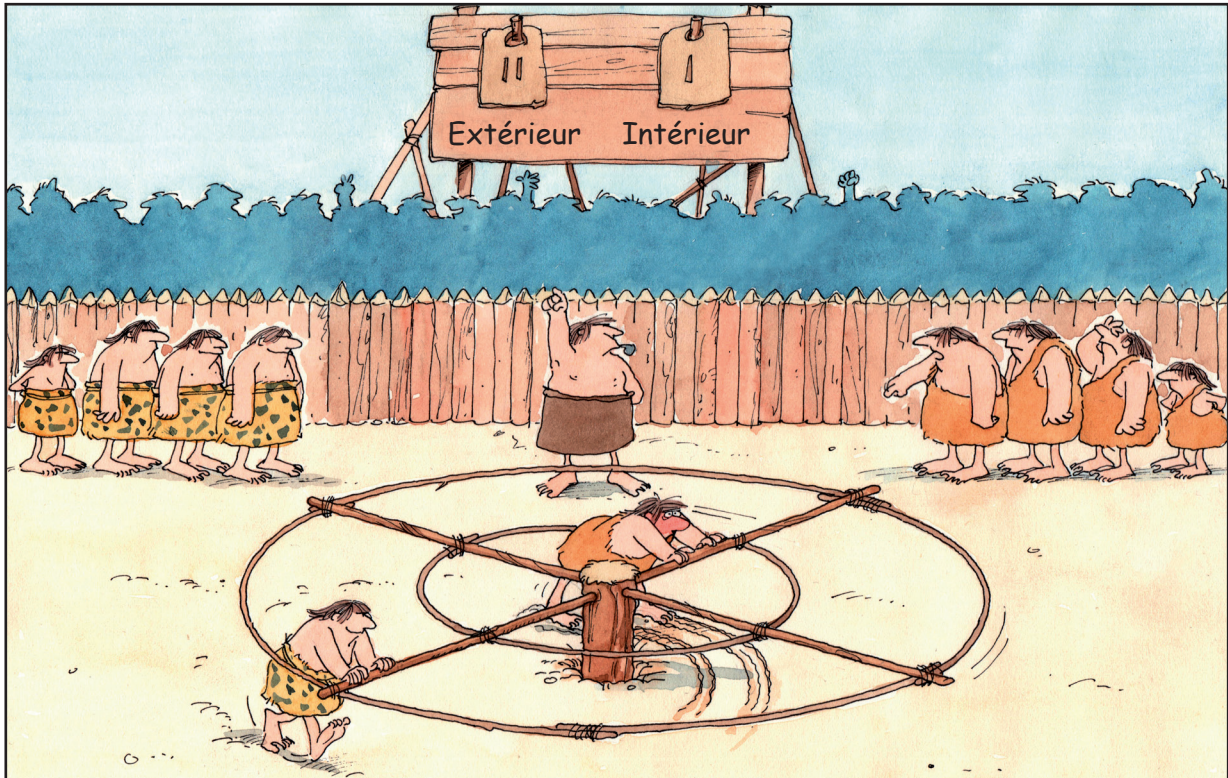


Fig. 16: Les torons extérieurs ont un avantage du fait de leur plus grand bras de levier.

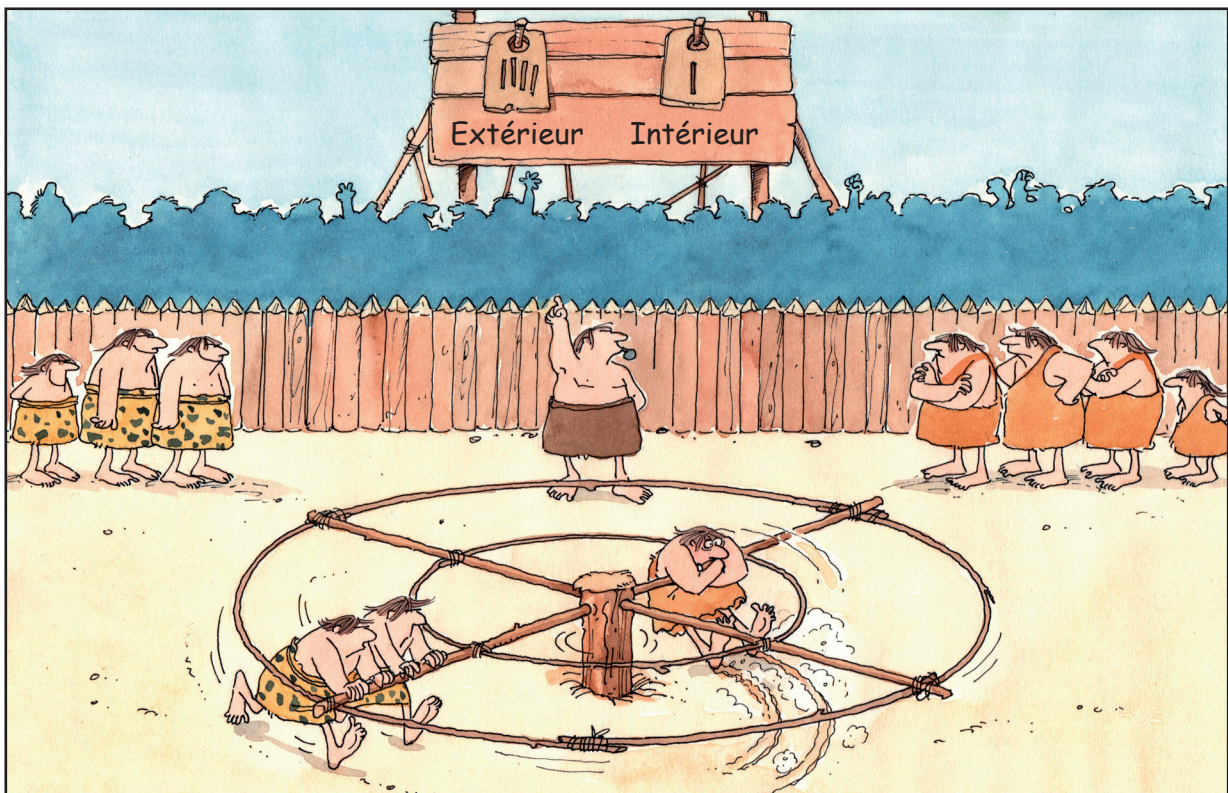


Fig. 17: Dans un câble 18*7 la section métallique des torons extérieurs est le double de celle de l'âme.

C'est exactement ce qui se passe pour les câbles 18 x 7 et 18 x 19 et leurs nombreuses déclinaisons. Dans ces constructions, six torons intérieurs doivent se battre contre douze torons extérieurs du même diamètre qui en plus bénéficient d'un bras de levier deux fois plus long. Les câbles de cette conception ne peuvent être convenablement antigiratoires que si les torons intérieurs sont désespérément surchargés !

En d'autres termes, pour ces câbles, l'âme sera toujours surchargée. Elle se détériorera donc à un rythme beaucoup plus rapide que les torons extérieurs. Les fils cassés internes font partie du concept.

La Fig. 18 montre comment l'équilibre devrait être atteint: les athlètes situés à l'intérieur avec le petit bras de levier devraient être plus nombreux que ceux de l'extérieur qui bénéficient du grand bras de levier !

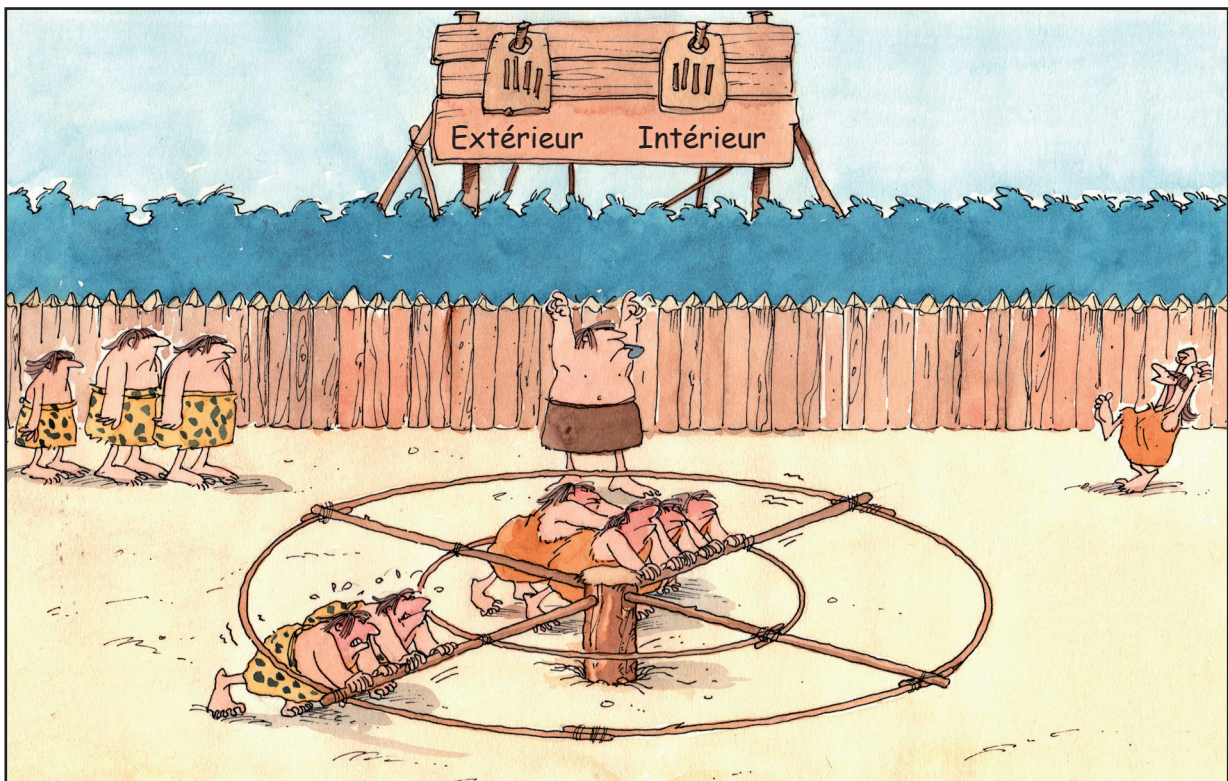


Fig. 18: L'équilibre est atteint car les athlètes situés à l'intérieur avec le petit bras de levier sont plus nombreux que ceux situés à l'extérieur avec le grand bras de levier.

Et c'est exactement de cette façon que les bons câbles antigiratoires arrivent à être stables sans surcharger l'âme: la section métallique de leur âme est considérablement plus grande que celle des torons extérieurs. Les câbles antigiratoires doivent avoir plus de métal dans l'âme que dans les torons extérieurs !

4.2. Solution: Câbles antigiratoires spéciaux avec âme compactée et torons extérieurs compactés

La Fig. 19 montre la section d'un câble de levage antigiratoire à 40 torons avec une âme compactée et des torons extérieurs compactés. Le compactage d'une âme déjà constituée procure au câble une charge de rupture plus élevée et une plus grande résistance à la rotation. De plus, l'augmentation de la surface de contact d'une âme lisse conduit à une considérable réduction des pressions au niveau des contacts entre l'âme métallique et les torons extérieurs qui sont également compactés et lisses (Fig. 20). Ceci réduit les risques de rupture de fils internes.

Les câbles antigiratoires tels que 35xK7 ou 40xK7 doivent de préférence être utilisés avec un émerillon libre.

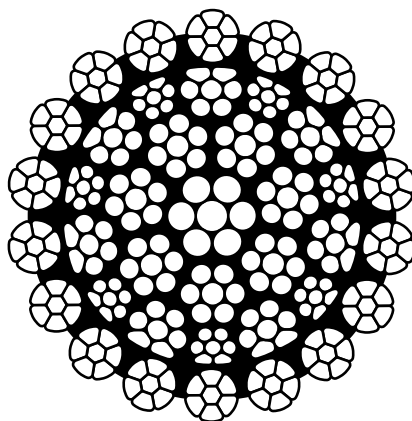


Fig. 19: Câble de levage antigiratoire à 40 torons avec âme compactée et torons extérieurs compactés

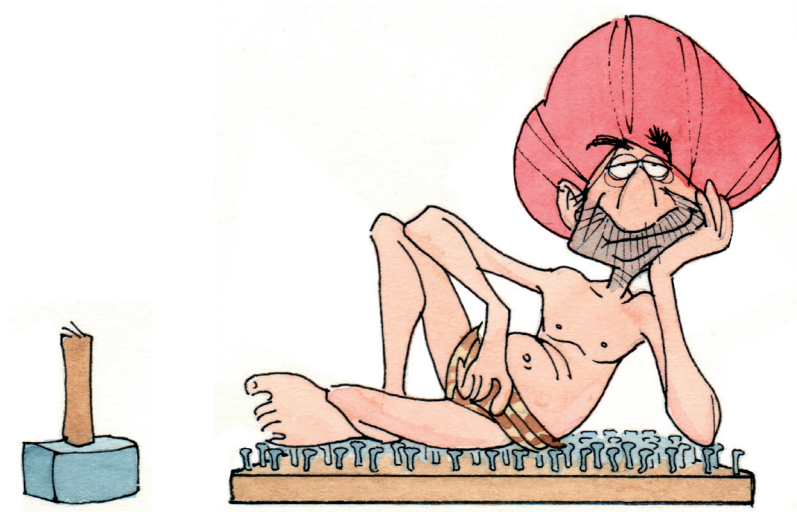


Fig. 20: L'augmentation de la surface de contact d'une âme lisse conduit à une considérable réduction des pressions au niveau des contacts entre l'âme métallique et les torons extérieurs qui sont également compactés et lisses, réduisant les risques de rupture de fils internes.

5. Le contrôle électromagnétique des câbles

Les fils cassés à l'intérieur du câble peuvent être détectés par l'utilisation d'instruments de contrôle électromagnétique. Ces contrôles peuvent être réalisés aussi bien par des opérateurs qualifiés de l'entreprise qui exploite la grue ou le pont roulant (Fig. 21) que par des sociétés indépendantes offrant ce type de service.

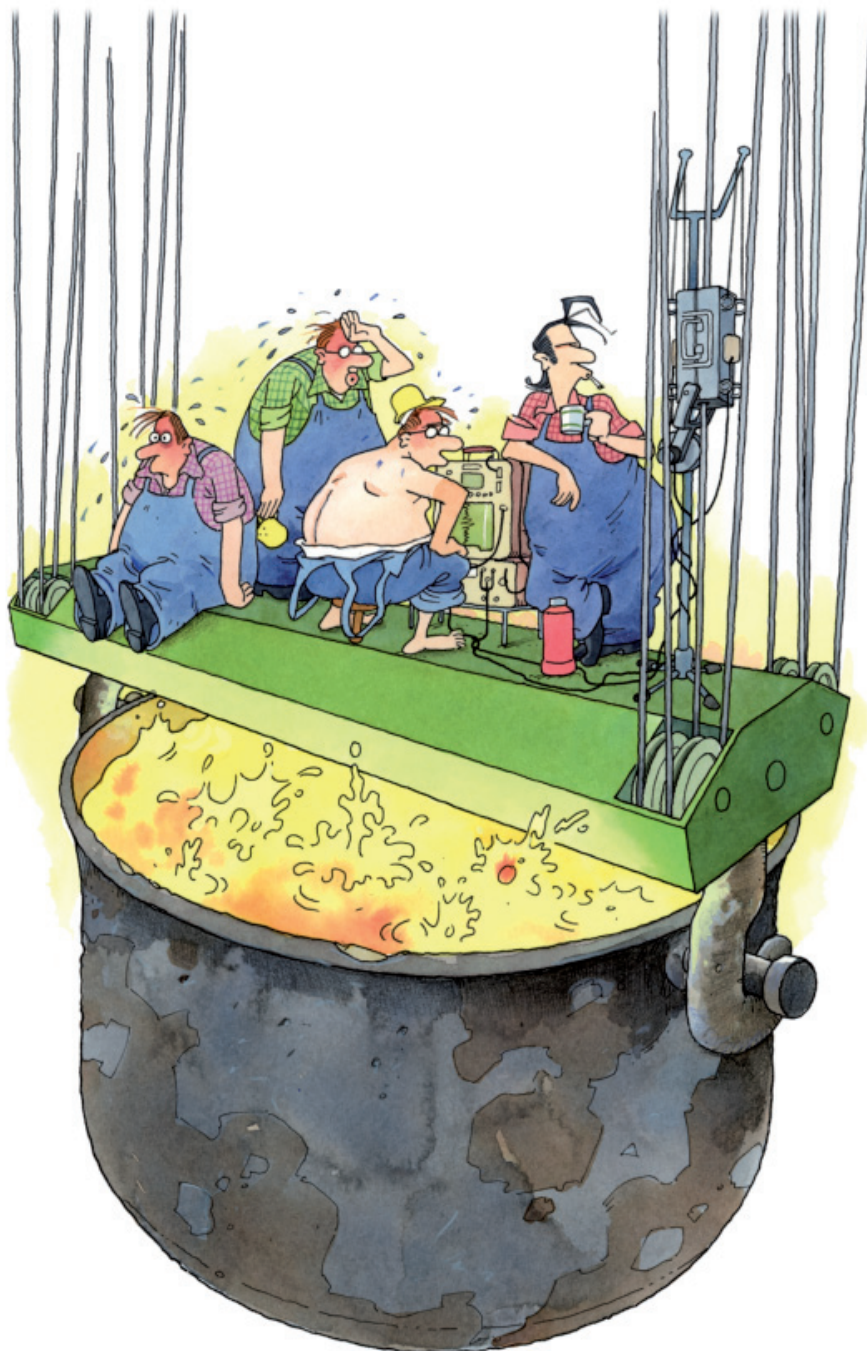


Fig. 21: Contrôle électromagnétique sur pont de coulée en aciérie

6. Problème: La corrosion des câbles métalliques

La surface de l'ensemble des fils constituant un câble est environ 16 fois plus grande que la surface d'une barre ayant la même section métallique (Fig. 22). Cela signifie que si aucune précaution n'est prise, dans une ambiance corrosive un câble métallique se corrodera environ 16 fois plus vite qu'une barre d'acier.

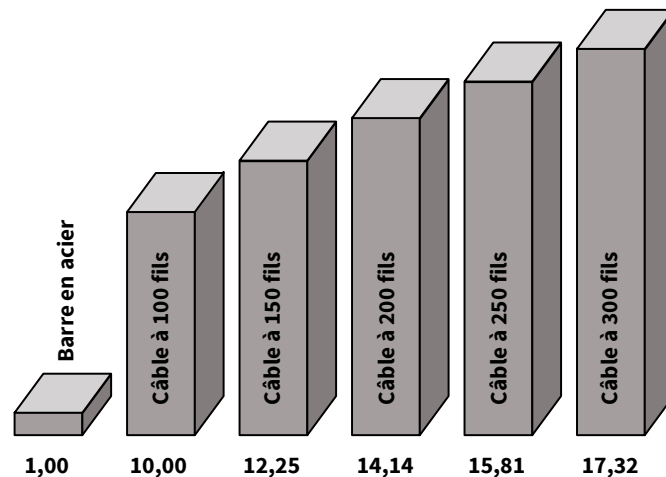


Fig. 22: La surface totale des fils constituant un câble est environ 16 fois celle d'une barre d'acier ayant une section métallique comparable.

6.1. Solution 1: Fils galvanisés et âme plastifiée

Les câbles métalliques utilisés dans des ambiances agressives devraient être construits avec des fils galvanisés. Même si la couche de zinc est localement abrasée, la section de fils non couverte sera quand même protégée par le zinc des fils voisins (protection cathodique).

L'âme du câble pourra de plus être plastifiée. La couche de plastique retiendra le lubrifiant de production à l'intérieur de l'âme et maintiendra les éléments agressifs à l'extérieur.

6.2. Solution 2: Re lubrification à intervalles réguliers

La protection en zinc des fils d'un câble va se réduire au cours de l'utilisation du câble. De plus en plus de lubrifiant sera également perdu. Afin, d'une part de réduire les frottements entre les éléments du câble et entre le câble et la poulie (tambour), et d'autre part de protéger les surfaces contre l'environnement agressif, les câbles devraient être relubrifiés à intervalles réguliers durant leur service. La Fig. 23 montre différentes solutions de re lubrification de câbles métalliques.

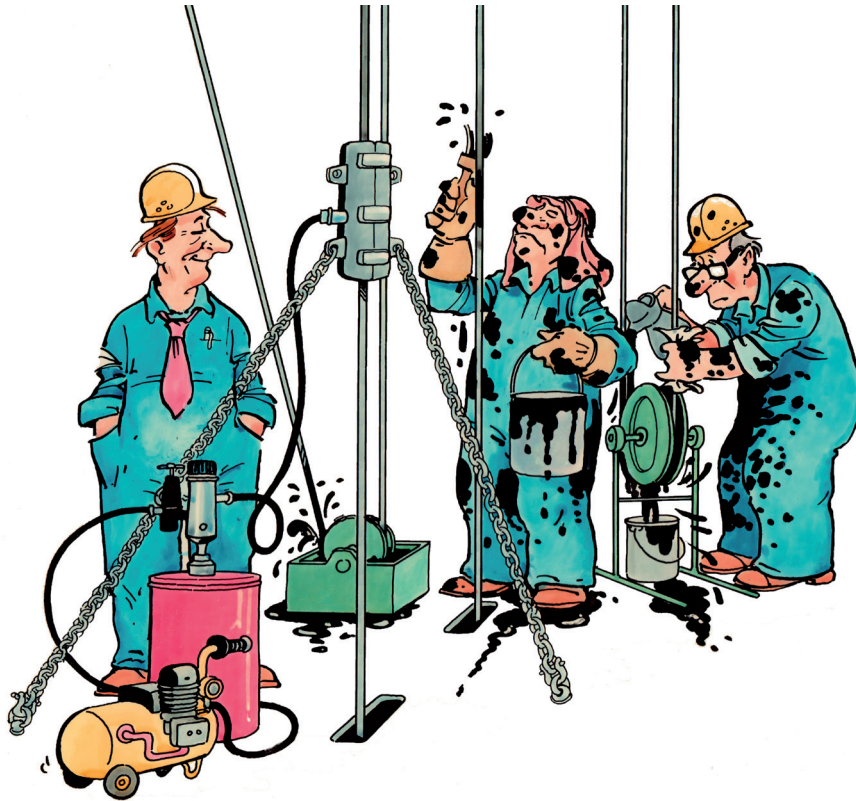


Fig. 23: Différentes méthodes de re lubrification de câbles métalliques.

7. Problème: Durée de vie en fatigue non satisfaisante

Les câbles des grues ou des ponts roulants qui évoluent sur des poulies ou tambours sont soumis à des sollicitations de fatigue en flexion et de fatigue en tension. La durée de vie du câble ne donne pas toujours satisfaction.

7.1. Solution 1: Utilisation de câbles très résistants à la fatigue

Les câbles métalliques ont des durées de vie différentes en fonction de leur construction. Du fait de leur plus grand nombre d'éléments – ce qui conduit à de plus faibles contraintes de flexion – et de leur plus grand nombre de points de contact sur les poulies – ce qui conduit à de plus faibles pressions de contact – les câbles à 8 torons sont nettement plus résistants en fatigue de flexion que les câbles à 6 torons (Fig. 24).

Les câbles avec torons extérieurs compactés (Fig. 25) ont une plus grande section métallique que les câbles construits avec des torons conventionnels et par conséquent, pour un même chargement, travaillent avec un coefficient de sécurité plus grand. Ils ont également de bien meilleures conditions de contact avec les poulies que les câbles à torons conventionnels (Fig. 26). Ainsi, les câbles avec torons extérieurs compactés ont généralement une meilleure résistance à la fatigue que les câbles à torons conventionnels.

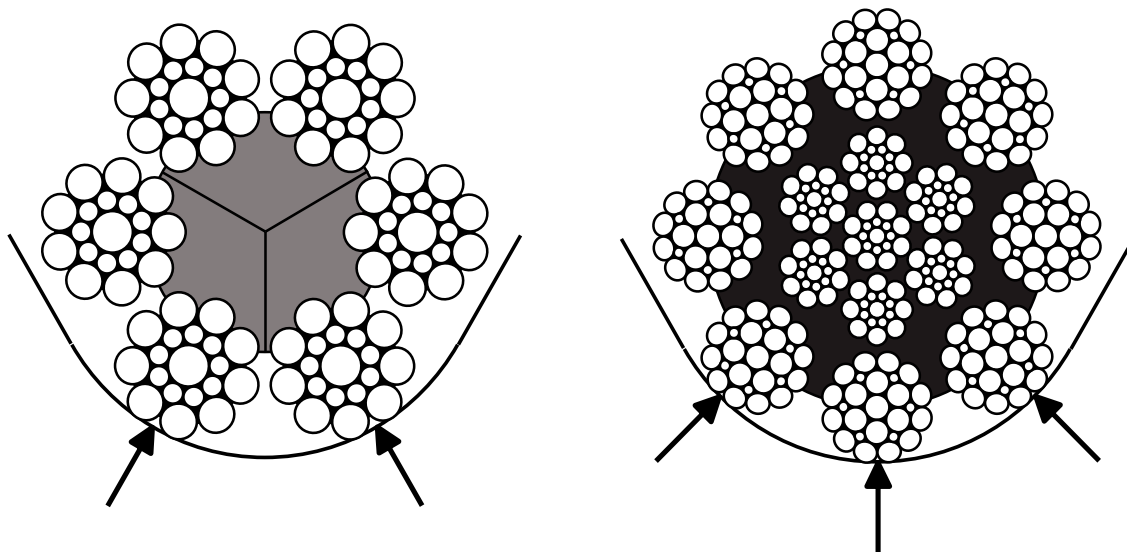


Fig. 24: Du fait de leur plus grand nombre de points de contact sur les poulies – ce qui conduit à une plus faible pression de contact – les câbles à 8 torons (à droite) sont très nettement plus résistants aux sollicitations de fatigue de flexion que les câbles 6 torons (à gauche).

Les câbles avec une couche plastifiée entre l'âme métallique et les torons extérieurs ne sont pas seulement très nettement plus résistants aux sollicitations de fatigue de flexion que les câbles comparables sans plastification, ils montrent également une bien meilleure résistance aux sollicitations de fatigue en traction. En cas de chocs, la couche plastifiée agit comme un amortisseur, réduisant ainsi les pics de contrainte entre les fils.

Les chocs étant généralement introduits dans la grue ou le pont roulant via le câble, cet amortisseur intégré ne se contente pas seulement d'augmenter la durée de vie du câble. Il apporte également de bien meilleures conditions de services pour les autres composants de l'appareil de levage.

7.2. Solution 2: Optimisation du diamètre du câble pour la fatigue en flexion

Le professeur Feyrer de l'université de Stuttgart a développé une formule permettant la prédiction de la durée de vie des câbles.

$$\lg N = b_0 + (b_1 + b_4 \sum \lg \frac{D}{d}) \sum (\lg \frac{S d_0^2}{d^2 S_0} \pm 0.4 \sum \lg \frac{R_0}{1770}) + b_2 \sum \lg \frac{D}{d} + b_3 \sum \lg \frac{d}{d_0} + \frac{1}{b_5 + \lg \frac{1}{d}}$$

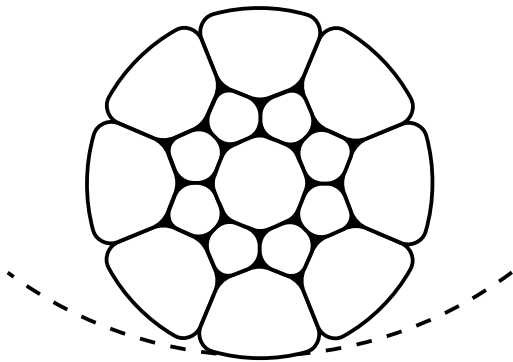


Fig. 25: Bonnes conditions de contact pour des torons extérieurs compactés.

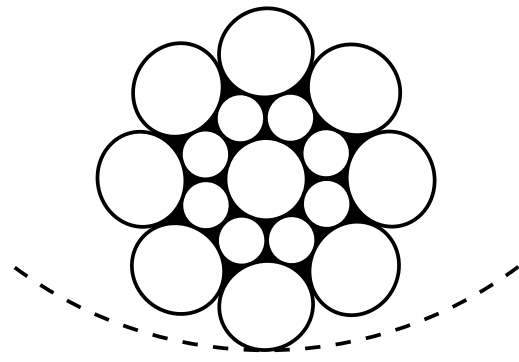


Fig. 26: Mauvaises conditions de contact pour des torons conventionnels.

Les paramètres spécifiques au câble b_0 à b_5 doivent être déterminés pour chaque type de câble par un grand nombre d'essais en fatigue. Ces paramètres sont déjà connus pour un grand nombre de câbles standard et pour beaucoup de câbles spéciaux.

Un des auteurs a écrit un programme qui calcule la durée de vie en fatigue de flexion en fonction du type de câble, du diamètre nominal du câble, du diamètre de la poulie et de la tension. Si la géométrie et les conditions de service de l'appareil de levage sont connues, il est possible de prédire le nombre de levages réalisables avant d'atteindre les critères de dépose ou la rupture du câble.

Même si le nombre en valeur absolue ne présente pas d'intérêt, le programme permet de comparer les durées de vie de différents types de câbles ou différents types d'installations.

Une caractéristique intéressante du programme réside en sa capacité à déterminer le diamètre optimal d'un câble. La Fig. 27 montre le nombre de cycles de flexion jusqu'aux critères de dépose (courbe inférieure) et jusqu'à la rupture (courbe supérieure) en fonction du diamètre nominal du câble pour un type de câble donné, une tension de 40 kN et pour une poulie de 600 mm de diamètre.

Un câble de diamètre nominal de 10 mm devra être déposé après seulement 50.000 cycles de flexion. Le rapport D/d entre le diamètre de la poulie (D) et le diamètre du câble (d) est de 60. Ceci est très favorable pour le câble de 10 mm. Evidemment la tension de 40 kN est beaucoup trop importante pour un câble d'aussi petit diamètre.

Si le diamètre du câble est porté à 20 mm, le nombre de cycles de flexion augmente à 340.000, presque 7 fois le chiffre précédent. Le rapport D/d a été réduit à 30 mais la section métallique du câble, donc aussi le coefficient de sécurité, ont été augmentés par un facteur 4. Le câble de diamètre 20 mm supportera donc beaucoup mieux la tension de 40 kN que le câble de 10 mm.

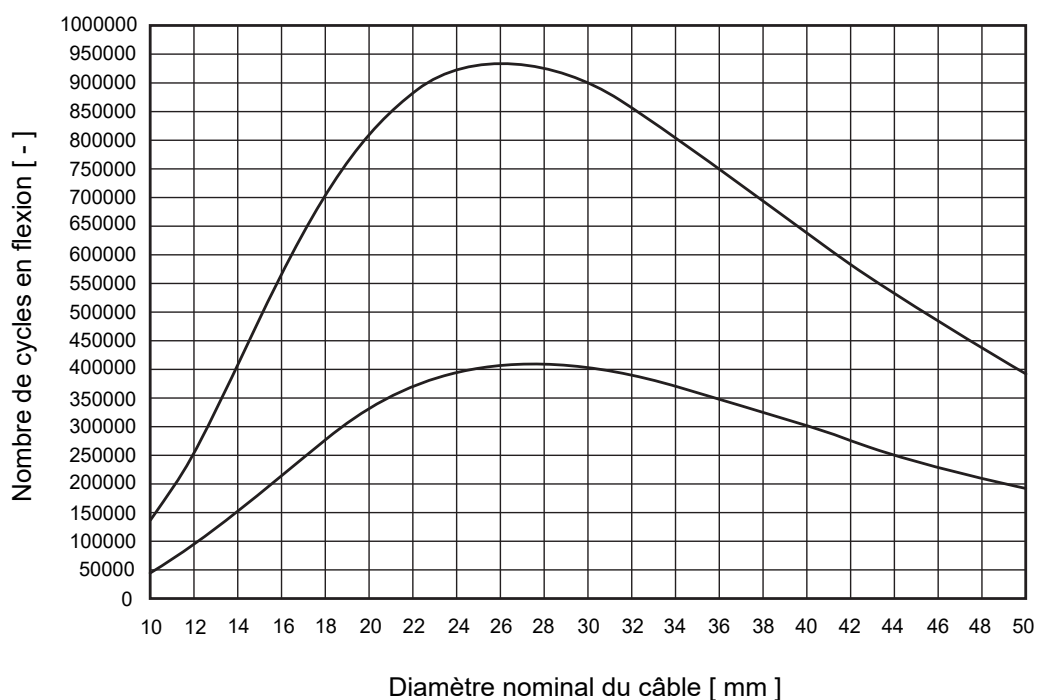


Fig. 27: Nombre de cycles de flexion jusqu'à dépose (courbe inférieure) et jusqu'à rupture (courbe supérieure) en fonction du diamètre nominal du câble.

Si l'on double encore une fois le diamètre du câble pour le porter à 40 mm, le nombre de cycles de flexion n'augmente plus. Le câble de 40 mm atteindra 300.000 cycles, ce qui est inférieur au résultat du câble de 20 mm. Le câble de 40 mm a une section métallique 16 fois plus grande que celle du câble de 10 mm. Il ne fatigue pas à cause des 40 kN de tension, mais à cause d'un rapport D/d de 15 très défavorable.

Dans la partie gauche des courbes de la Fig. 27, les câbles ont un rapport D/d favorable. Ils fatiguent à cause de coefficients de sécurité trop faibles.

Dans la partie droite des courbes, les câbles ont des coefficients de sécurité favorables. Ils fatiguent à cause des fortes contraintes de flexion générées par des rapports D/d trop faibles.

Le maximum des courbes de durée de vie se situe entre ces deux zones, où la somme des influences négatives, de la tension et de la flexion, est minimale.

« Le diamètre nominal optimal du câble » est le diamètre du câble correspondant au nombre de cycles maximum. Sur la Fig. 27, ce diamètre nominal optimal est de 27 mm. Un câble de ce diamètre supportera environ 410.000 cycles de flexion.

Un concepteur d'appareil de levage ne doit pas sélectionner un diamètre nominal supérieur au diamètre nominal optimal. Il ne ferait que dépenser plus d'argent pour obtenir en retour une durée de vie plus faible. Au contraire, il devrait choisir un diamètre nominal légèrement inférieur au diamètre nominal optimal.

Dans notre exemple (Fig. 27), un câble de diamètre nominal 24 mm réalise presque le même nombre de cycles qu'un câble de diamètre nominal 27 mm. Le câble de 24 mm est cependant 10% plus petit que celui correspondant au diamètre nominal optimal. Cela signifie que pour presque le même nombre de cycles de flexion, on peut utiliser un câble moins cher. De plus, l'utilisation d'un câble plus petit permettra de réduire significativement la largeur du tambour, ce qui allègera d'autant plus le coût global de l'appareil.

Pour le câble, le diamètre nominal le plus économique est souvent légèrement plus petit que le diamètre nominal optimal, par exemple 90% de ce dernier.

Pour les structures en acier, plus gros signifie toujours durée de vie plus grande. Pour les câbles métalliques c'est souvent l'opposé qui est vrai.

7.3. Solution 3: Optimisation du diamètre des poulies

L'augmentation du diamètre des poulies permet également d'améliorer la durée de vie d'un câble métallique. Le logiciel mentionné ci-dessus permet de calculer de combien il faut augmenter le diamètre de la poulie pour obtenir le résultat désiré. La Fig. 28 montre le nombre de cycles de flexion jusqu'à dépose (courbe inférieure) et jusqu'à rupture (courbe supérieure) en fonction du diamètre de la poulie.

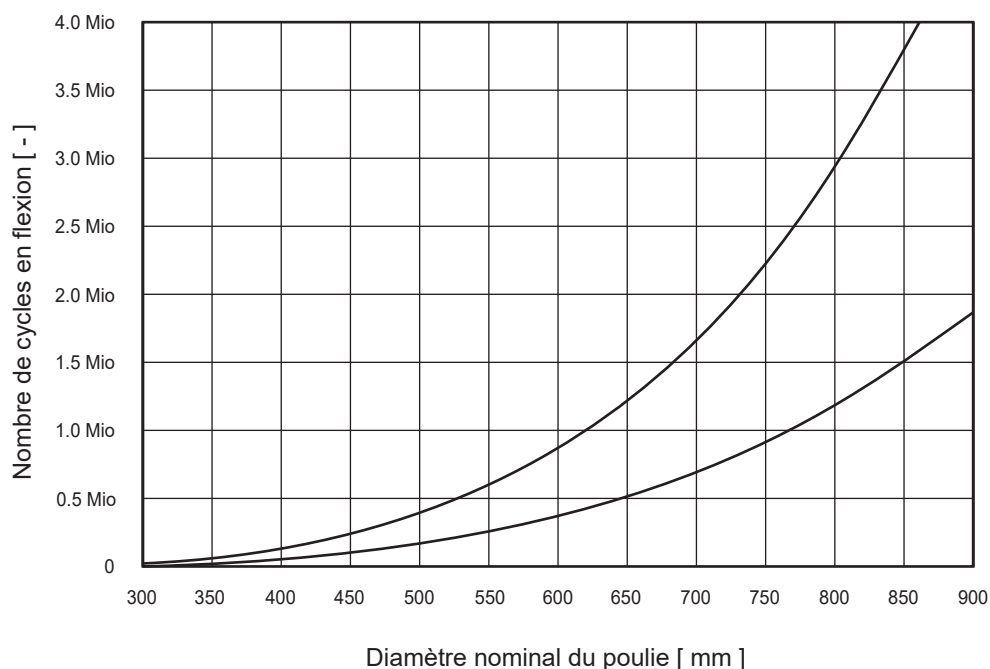


Fig. 28: Nombre de cycles de flexion jusqu'à dépose (courbe inférieure) et jusqu'à rupture (courbe supérieure) en fonction du diamètre de la poulie.

Une poulie de diamètre 600 mm permettra de réaliser 400.000 cycles avant d'atteindre le critère de dépose. L'augmentation du diamètre de la poulie, par exemple de 150 mm (+25%) permettra d'atteindre 900.000 cycles, soit une augmentation de 125%.

7.4. Solution 4: Elimination des fatigues en flexion superflues

Les câbles sont très souvent soumis à des flexions superflues. A titre d'exemple nous allons comparer la durée de vie de deux câbles métalliques qui assurent le même service, mais avec deux moufles différents.

La Fig. 29 montre un moufle constitué de deux petites poulies. Durant chaque opération de levage la portion de câble qui traverse le moufle subit deux flexions.

La Fig. 30 montre un moufle constitué d'une seule grosse poulie. Durant chaque opération de levage la portion de câble qui traverse le moufle subit seulement une flexion. Ce fait seul devrait conduire au doublement de la durée de vie. Mais le diamètre de la poulie est 2,5 fois plus grand que celui du premier moufle, par conséquent le nombre de cycles de flexion réalisable jusqu'à la dépose du câble sur cette grande poulie est 9 fois plus important que celui correspondant à la petite poulie.

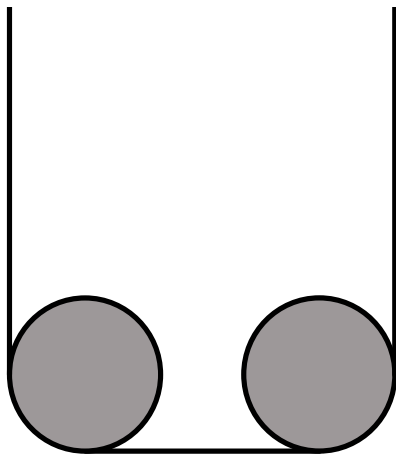


Fig. 29: Moufle avec deux petites poulies.

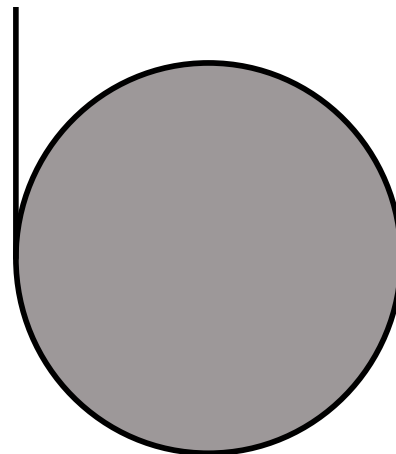


Fig. 30: Moufle avec seulement une grande poulie.

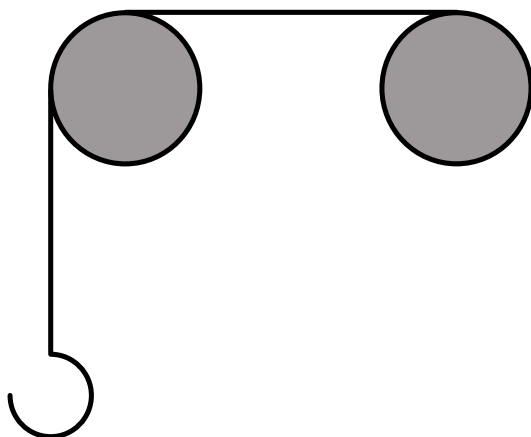


Fig. 31: Système de levage avec flexion simple.

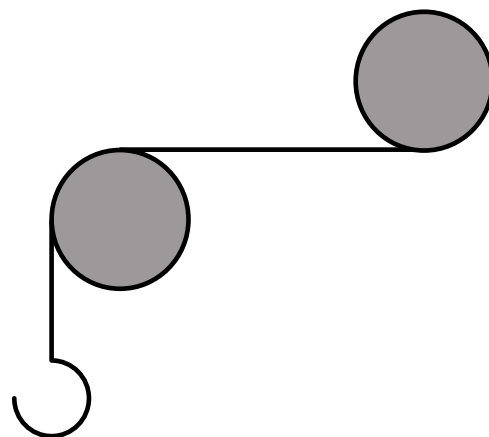


Fig. 32: Système de levage avec contre-flexion.

Par conséquent la durée de vie va encore être multipliée par un facteur 9, ce qui conduira à une durée de vie globale 18 fois plus grande que celle du premier cas !

Eviter les contre-flexions permet également d'augmenter la durée de vie.

Une seule contre-flexion pourra générer un endommagement correspondant à 2 à 7 flexions simples.

Comparons les deux systèmes de levage présentés en Fig. 31 et en Fig. 32. Chacun des systèmes intègre une poulie et un tambour. Pour le système selon Fig. 31, lors de la montée du crochet le câble effectue une flexion sur la poulie et une demi-flexion sur le tambour. Lors de la descente du crochet le câble effectue une demi-flexion sur le tambour et une flexion sur la poulie. Le câble effectue donc trois flexions par aller-retour du crochet. Pour le système selon Fig. 32, lors de la montée du crochet le câble effectue une demi-flexion sur la poulie et une contre-flexion entre la poulie et le tambour. Et lors de la descente du crochet le câble effectue une contre-flexion entre la poulie et le tambour et une demi-flexion sur la poulie.

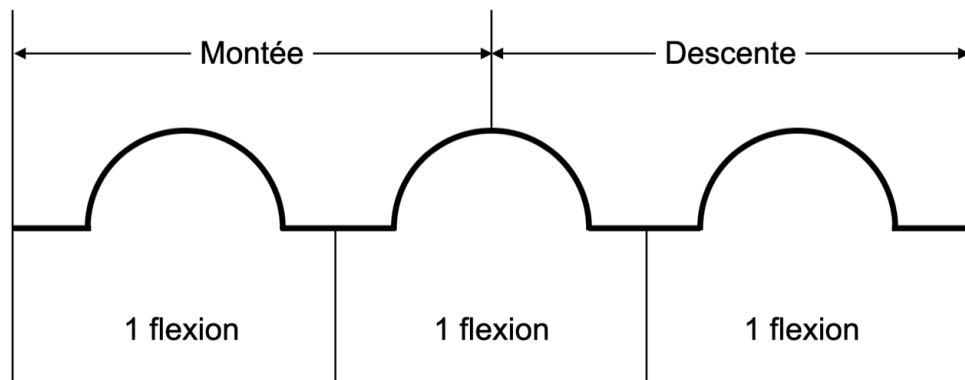


Fig. 33: Spectre de charge avec flexion simple (durée de vie 100%)

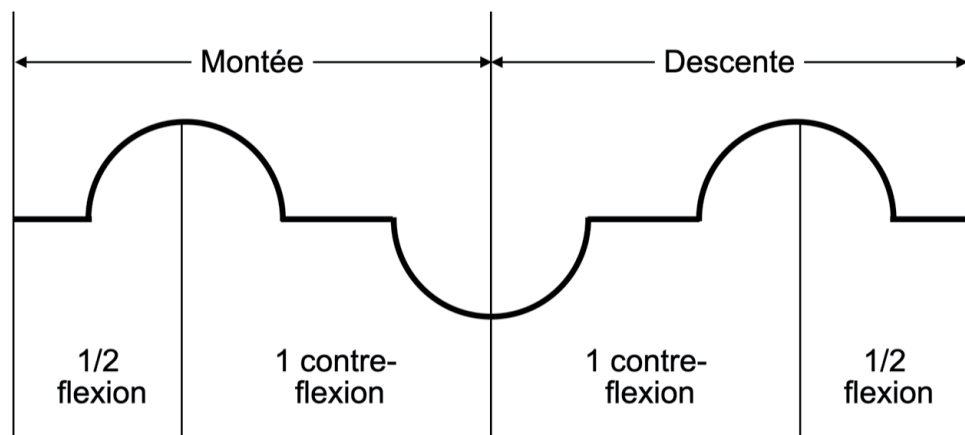


Fig. 34: Spectre de charge avec contre-flexion simple (durée de vie entre 60% et 20%)

Lors de la descente du crochet le câble effectue une contre-flexion entre le tambour et la poulie et une demi-flexion sur la poulie. Le câble effectue donc deux contre-flexions et une flexion simple par aller-retour du crochet. Du fait qu'une contre-flexion est équivalente à 2 à 7 flexions simples, le câble subit l'équivalent de $1+2 \times 2=5$ à $1+2 \times 7=15$ flexions simples. Le câble de l'appareil de levage schématisé en Fig. 31 aura donc une durée de vie de $5/3=1,7$ à $15/3=5$ fois supérieure à celle du câble du système selon Fig. 32.

7.5. Solution 5: Optimisation du diamètre du câble pour la fatigue en traction

Lors d'un essai de fatigue en traction, pour une amplitude de charge donnée, généralement la durée de vie de l'échantillon homogène et solide testé décroît si la charge moyenne augmente. De récents essais conduits à l'université de Stuttgart ont cependant mis en évidence qu'au-dessous d'une charge globale correspondant à environ 50% de leur charge de rupture, les câbles métalliques se comportent exactement de manière opposée: l'augmentation de la charge moyenne conduit à une durée de vie supérieure (Fig. 35).

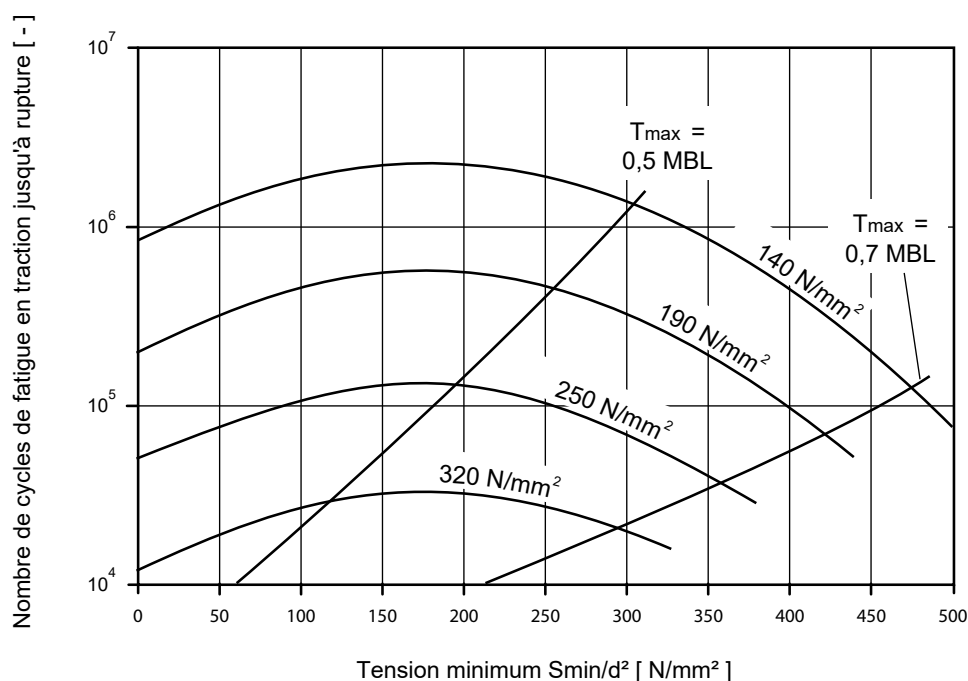


Fig. 35: Jusqu'à une valeur correspondant à environ 50% de la charge de rupture, l'augmentation de la charge moyenne conduit à une augmentation de la durée de vie, en fatigue de traction, des câbles métalliques.

Une explication de ce phénomène peut résider dans le fait qu'à l'opposé de ce qui se passe pour un échantillon homogène solide, le câble est une structure composite constituée de plusieurs éléments qui ont des mouvements relatifs lorsque le chargement évolue. Comme on peut le voir sur la courbe d'allongement d'un câble lors d'un essai en traction (Fig. 36), pour une même variation de charge les déplacements sont beaucoup plus petits lorsque la charge moyenne est grande.

Cela signifie que la durée de vie des câbles de haubanage d'une grue peut être augmentée en réduisant le diamètre du câble et en travaillant par conséquent avec un coefficient de sécurité plus faible.

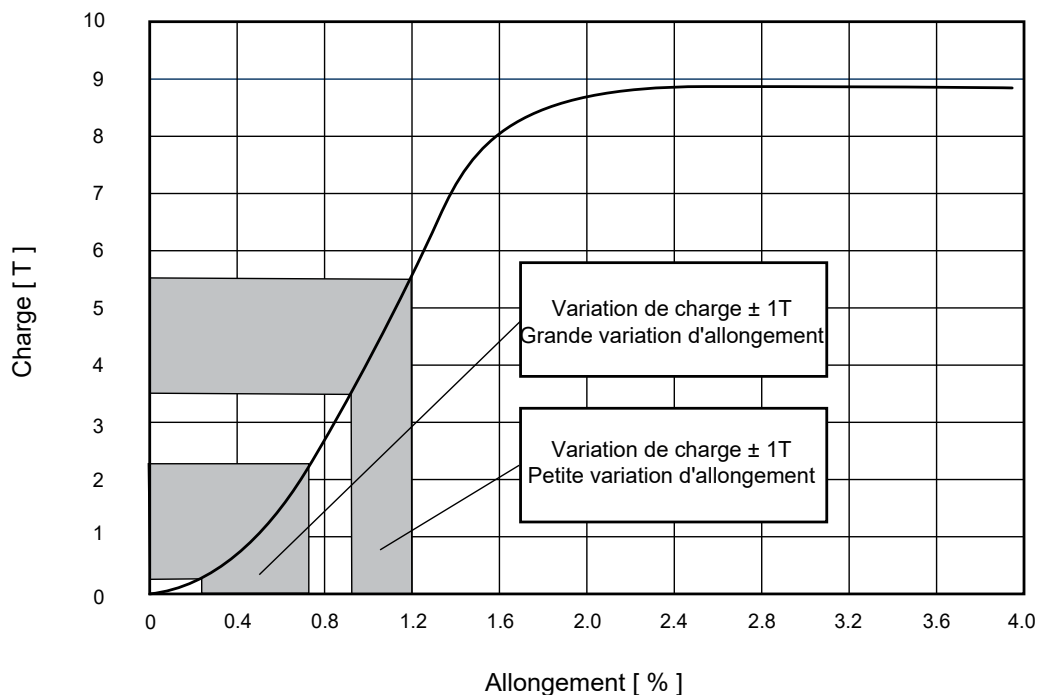


Fig. 36: Courbe charge-allongement typique d'un essai de traction d'un câble métallique. Pour une même amplitude de variation de charge, les déplacements sont beaucoup plus petits pour des charges moyennes fortes que pour des charges moyennes faibles.

8. Problème: Torons détendus et "cages à oiseaux"

On trouve de temps en temps des déformations de câble telles que torons détendus ou « cages à oiseaux ». Elles sont souvent attribuées à des effets dynamiques (choc), ce qui dans la plupart des cas n'est pas correct.

Dans la majorité des cas les torons détendus et les « cages à oiseaux » sont le résultat d'une rotation du câble autour de son axe. Prenons le cas d'un câble qui est fixé à ses deux extrémités. Si l'on prend ce câble par le milieu et on lui impose une rotation (Fig. 37), il va s'allonger d'un côté et se raccourcir de l'autre (Fig. 38). Par conséquent les torons extérieurs seront trop longs d'un côté (Fig. 39), et les torons intérieurs seront trop longs de l'autre côté (Fig. 40).

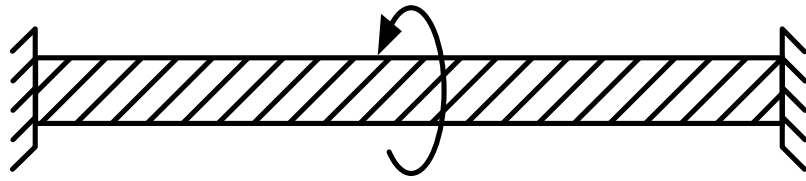


Fig. 37: Une rotation forcée du câble...

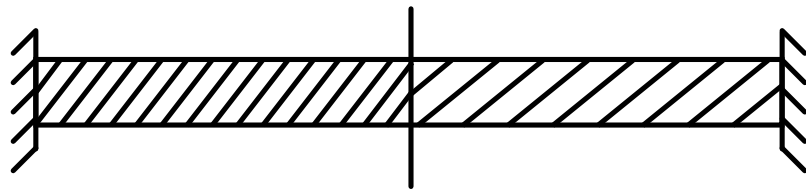


Fig. 38: ... réduit le pas de câblage d'un côté (gauche) et augmente le pas de câblage de l'autre côté (droite).



Fig. 39: Surlongueur des torons extérieurs causée par un détournage du câble.

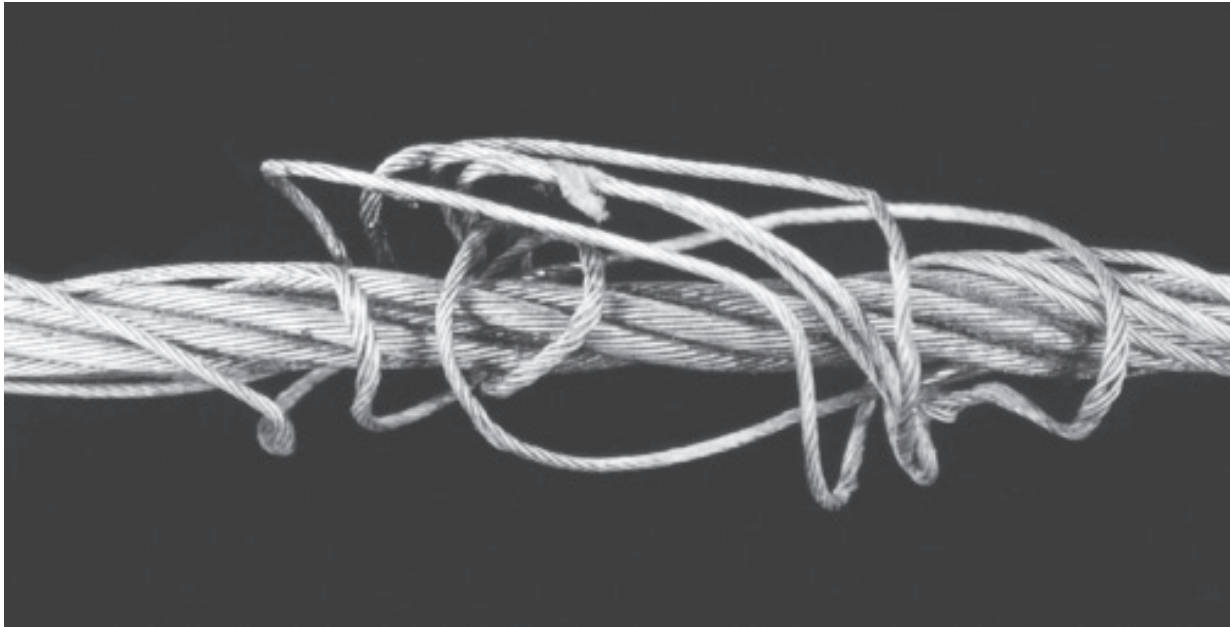


Fig. 40: Surlongueur des torons intérieurs causée par une fermeture du même câble.

Mais qu'est-ce qui, sur un appareil de levage, pourrait bien faire vriller le câble?
Réponse: Chaque poulie ou chaque tambour.

Si un câble entre sur une poulie avec un angle de déflexion, il va dans un premier temps toucher le flanc de la gorge et ensuite il roulera jusqu'à atteindre le fond de cette dernière (Fig. 41). Ce phénomène de roulement provoque une sollicitation en rotation du câble.

La torsion du câble augmentera avec l'augmentation de l'angle de déflexion. Les Fig. 42 et Fig. 43 illustrent les différentes étapes de l'entrée d'un câble sur une poulie ayant un angle d'inclinaison des flancs de gorge de 35° (conforme aux normes américaines).

Si le câble attaque une poulie avec un angle de déflexion de 1° , il touchera le flanc de la gorge alors qu'il sera déjà dans une position proche du fond de cette gorge. Il ne sera tordu que de 5° .

Si le câble attaque la même poulie avec un angle de déflexion de 5° , il touchera le flanc de la gorge alors qu'il est encore dans une position éloignée du fond de cette gorge. Il sera alors tordu d'environ 50° !

Bien sûr, le câble ne va pas simplement rouler jusqu'au fond de la gorge comme s'il était engrené. Le mouvement de descente sera une composition de rotation et de glissement. Par conséquent, la quantité de rotation introduite dans le câble dépend également du coefficient de frottement entre le câble et le flanc de la gorge.

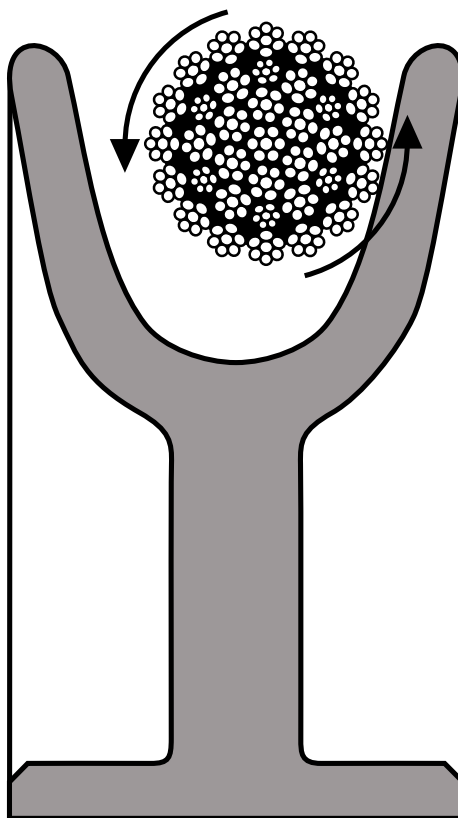


Fig. 41: Le câble roule jusqu'au fond de la gorge, subissant ainsi une sollicitation en rotation.

8.1. Solution 1: La lubrification du câble

La lubrification du câble est le moyen le plus simple de réduire le coefficient de frottement entre le câble et la poulie. Un câble bien lubrifié sera moins sollicité en rotation qu'un câble sec ou corrodé.

8.2. Solution 2: Poulies acier au lieu de poulies plastiques

Le coefficient de frottement du contact acier/plastique est plus grand que celui du contact acier/acier. Pour une géométrie équivalente, un câble métallique sera par conséquent bien moins sollicité en rotation par une poulie acier que par une poulie plastique. Les poulies plastiques ne devraient être utilisées que lorsque les angles de déflexion sont faibles.

8.3. Solution 3: Poulies avec gorges plus ouvertes

Si la gorge de la poulie est large, à angle de déflexion équivalent le câble touchera le flanc de la gorge dans une position plus proche du fond de cette gorge. Les poulies devraient donc avoir un angle d'ouverture de gorge important. 45° (par exemple selon DIN 15061) constitue un minimum absolu. Un angle de 52° (selon British Standard) est bien sûr meilleur. Sur l'initiative des auteurs les normes Européennes (EN 13135), et les normes internationales (ISO 16625), autorisent des angles jusqu'à 60° .

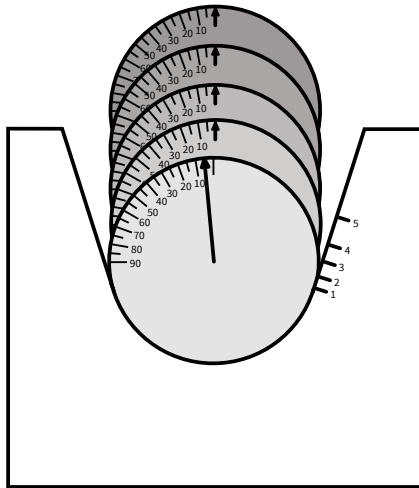


Fig. 42: Gorge à 35° . Légère sollicitation en rotation pour un angle de déflexion de 1° .

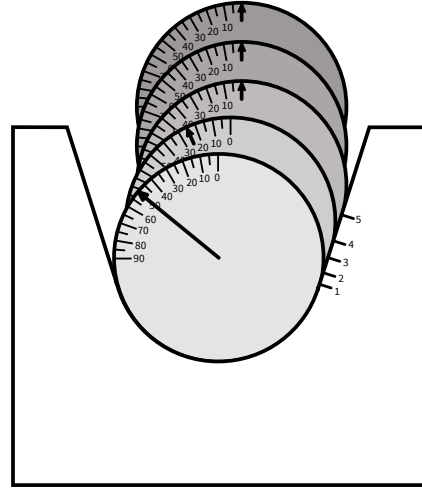


Fig. 43: Gorge à 35° . Forte sollicitation en rotation pour un angle de déflexion de 5° .

La Fig. 44 illustre les différentes étapes de l'entrée, sous un angle de déflexion de 5° , d'un câble sur une poulie ayant un angle d'ouverture des flancs de gorge de 60° .

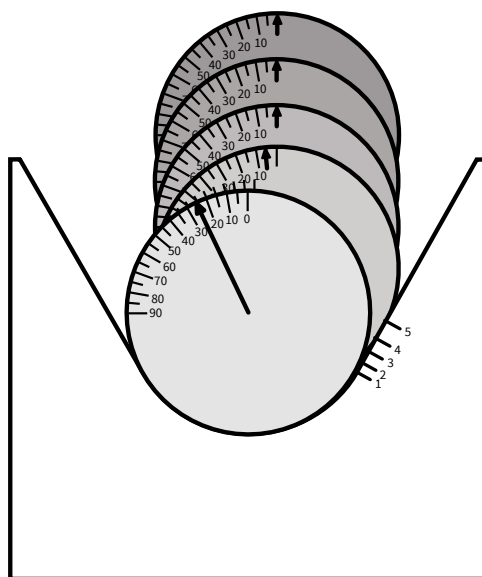


Fig. 44: Gorge à 60° . Sollicitation en rotation réduite pour un angle de déflexion de 5° .

Le câble touche le flanc de la gorge dans une position bien plus proche du fond de cette gorge qu'il ne le faisait dans la Fig. 41. Il n'est sollicité en rotation que de 25° . L'augmentation de l'angle d'ouverture de 35° à 60° permet de réduire de 50% la sollicitation de rotation. Sur l'initiative des auteurs les normes Européennes (EN 13135), et les normes internationales (ISO 16625), autorisent des angles jusqu'à 60° .

8.4. Solution 4: Utilisation de câbles métalliques plastifiés

Les câbles construits avec une couche plastique entre l'âme et les torons extérieurs sont beaucoup plus résistants à la formation de « cages à oiseaux » que n'importe quel autre câble.

8.5. Solution 5: Adaptation du profil de gorge

Des gorges trop petites peuvent aussi être à l'origine de la création de « cages à oiseaux » ou de torons détendus. Si le rayon de la gorge est trop petit (Fig. 45), le câble sera compressé lors de son passage sur la poulie.

Les torons extérieurs seront alors trop longs par rapport au diamètre réduit du câble. La poulie va pousser devant elle les longueurs surabondantes, qui vont par conséquent s'accumuler en un seul point (généralement dans la zone qui dans le cadre d'un mouvement typique s'immobilise devant la poulie et ne la traverse pas). L'accumulation de surlongueurs va créer des torons détendus ou des cages à oiseaux.

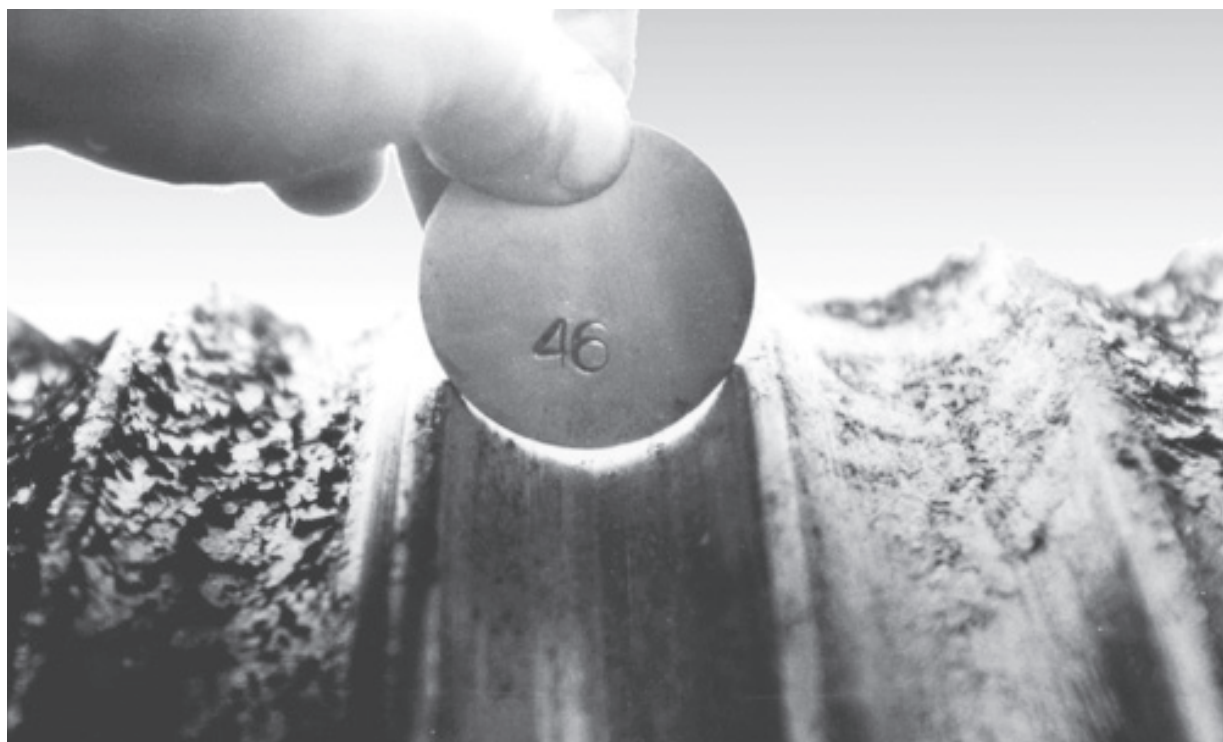


Fig. 45: Gorge trop petite.

Le rayon du fond de la gorge devrait mesurer de 0,53 à 0,54 fois le diamètre nominal du câble. S'il est plus petit, la poulie doit être soit réusinée soit remplacée. Si cela n'est pas possible un câble de même charge de rupture mais de diamètre nominal plus petit devra être utilisé afin de répondre aux exigences géométriques indiquées ci-dessus.

9. Problème: Ecrasement sur le tambour

Souvent les câbles métalliques souffrent d'endommagement mécanique sur les tambours. A cause d'un angle de déflexion excessif, le câble pourrait par exemple être poussé contre la spire voisine (Fig. 46), ce qui endommagerait les fils extérieurs dans les zones de contact. A angle de déflexion équivalent le phénomène sera d'autant plus marqué que le D/d augmente.



Fig. 46: A cause d'un angle de déflexion excessif, le câble est poussé contre la spire voisine. Les fils extérieurs sont endommagés dans les zones de contact.

9.1. Solution 1: Utilisation de tambours rainurés ou Lebus®

Les tambours rainurés doivent être préférés aux tambours lisses. Les tambours Lebus® devraient être utilisés pour les enroulements multicouches.

9.2. Solution 2: Utilisation de câbles Lang

Sur l'extérieur d'un câble croisé les fils extérieurs sont alignés selon la direction de l'axe du câble. Les fils extérieurs de deux spires voisines pourront donc s'engrener (Fig. 47).

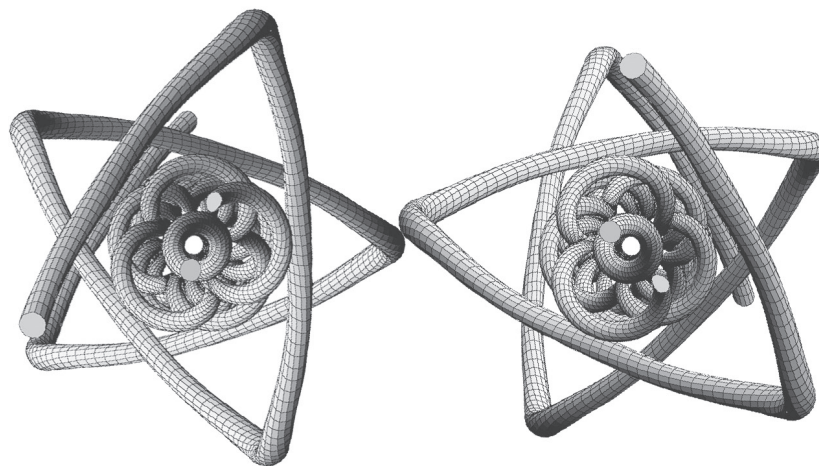


Fig. 47: Câbles croisés: Engrènement.

Si l'on utilise des câbles Lang (Fig. 48), les fils extérieurs de deux spires voisines ne pourront pas s'engrener. En effet, au niveau des contacts les fils sont inclinés vers le haut d'un côté et vers le bas de l'autre côté. Par conséquent ces fils s'abîmeront beaucoup moins lorsqu'ils seront mis en contact lors de l'enroulement sur le tambour.

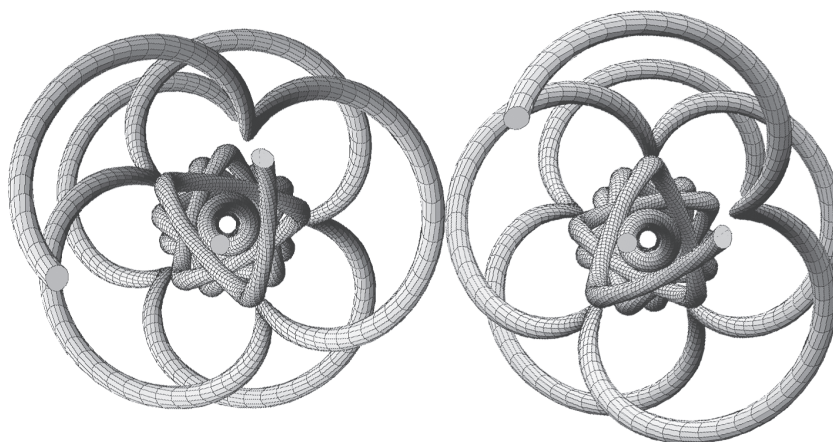


Fig. 48: Câbles Lang: Pas d'engrènement.

9.3. Solution 3: Utilisation de câbles avec de gros fils extérieurs

Il est également connu que les câbles avec de gros, donc plus robustes fils extérieurs se comportent mieux en enroulement multicouche. Les fils extérieurs d'un toron Seale 19 ont un diamètre 42% plus grand que ceux d'un toron Warrington-Seale 36. Leur section métallique est 100% supérieure, ils sont par conséquent beaucoup plus robustes et plus résistants à l'abrasion.

Bien sûr le comportement en fatigue de flexion d'un toron Seale 19 est plus mauvais que celui d'un WS 36, mais qui cela intéresse-t-il si le problème relève de l'écrasement sur le tambour et non de fatigue à l'enroulement ?

9.4. Solution 4: Utilisation de câbles avec torons extérieurs compactés

Une grande partie des dommages causés lors d'un enroulement multicouche provient des « engrènements » entre les fils extérieurs des spires voisines (Fig. 49). Par contre, si les torons extérieurs du câble sont compactés (Fig. 50), les « engrènements » entre les fils extérieurs ne sont plus possibles. Par conséquent les endommagements sont grandement réduits.

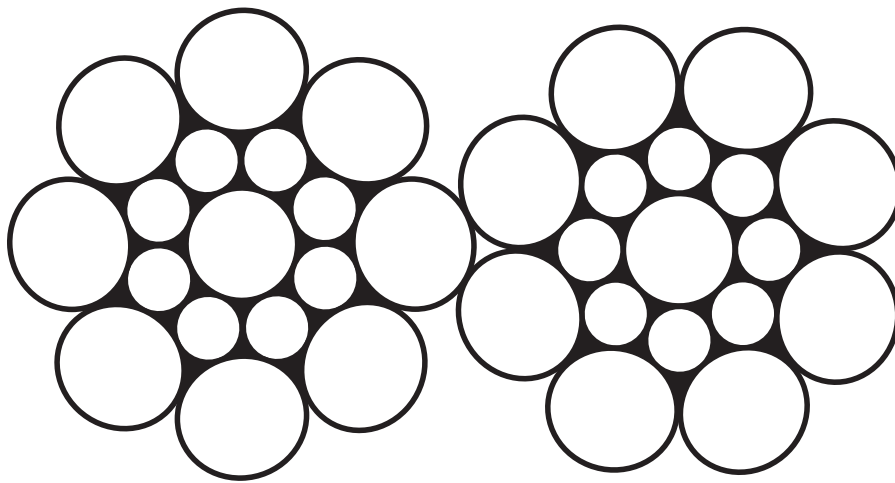


Fig. 49: Torons extérieurs conventionnels: permettent « l'engrènement » entre fils extérieurs.

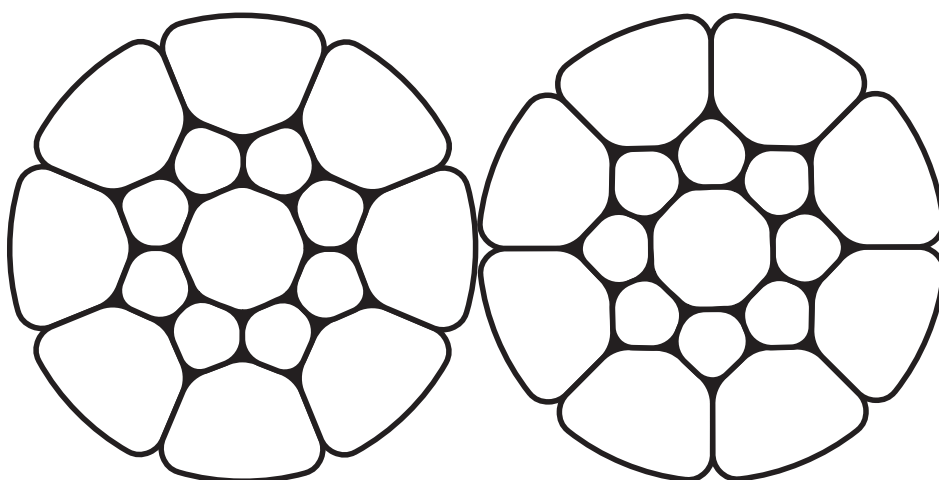


Fig. 50: Torons extérieurs compactés: préviennent « l'engrènement » entre fils extérieurs.

9.5. Solution 5: Utilisation de câbles martelés

La majorité des endommagements auxquels un câble est exposé durant un enroulement multicouche a pour cause le fait que la surface extérieure du câble n'est pas lisse. L'enchaînement de monts et vallées le long de la circonférence du câble en est la principale cause. Il faut donc rendre la surface extérieure du câble aussi lisse et aussi ronde que possible.

Ce résultat est obtenu en martelant le câble à l'aide d'une machine rotative.

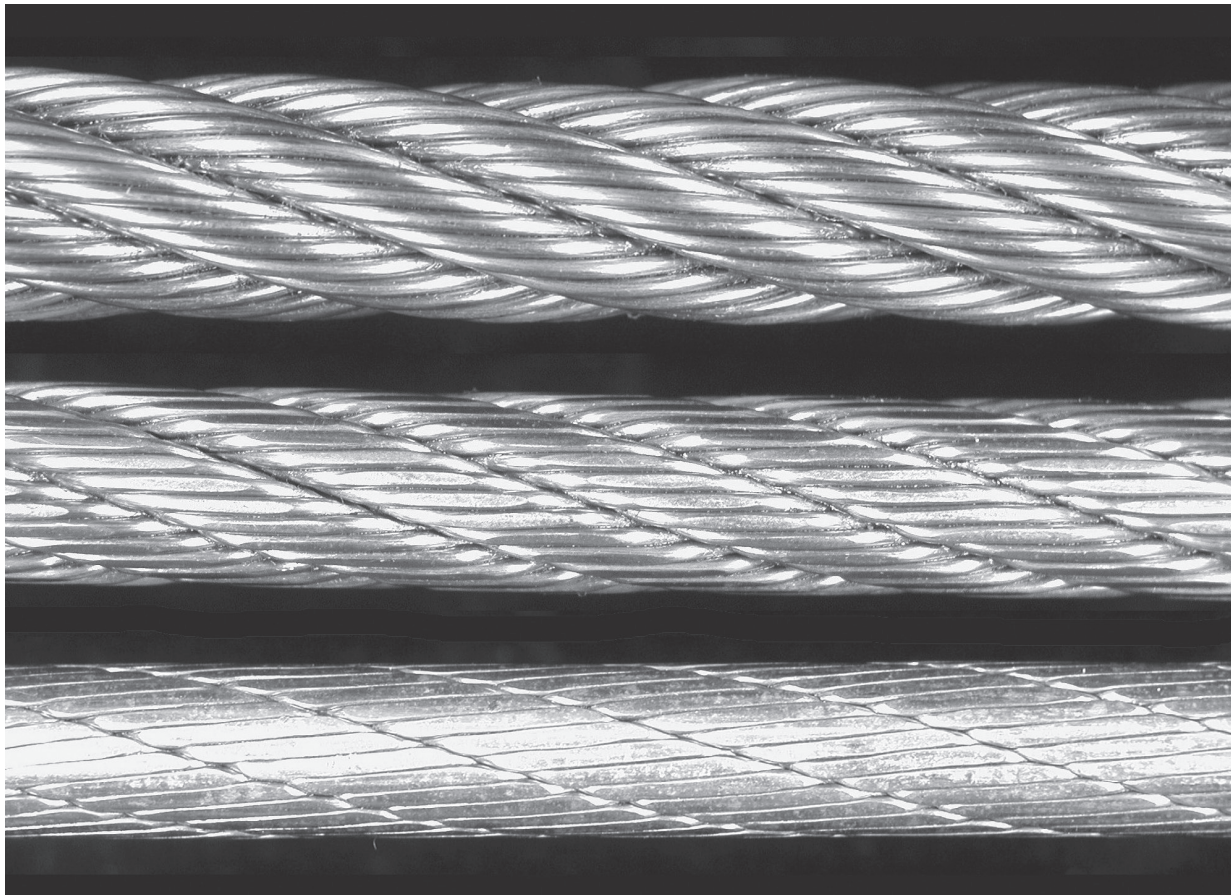


Fig. 51: Un câble avant martelage (haut), après martelage (réduction typique, milieu) et après martelage (réduction sévère, bas).

La Fig. 51 montre un câble avant le martelage (haut) puis dans deux différents degrés de martelage et donc de réduction de diamètre.

10. Problème: Les bons câbles sont chers

La qualité a son prix, ainsi les câbles performants sont plus chers que les câbles avec une construction simple.

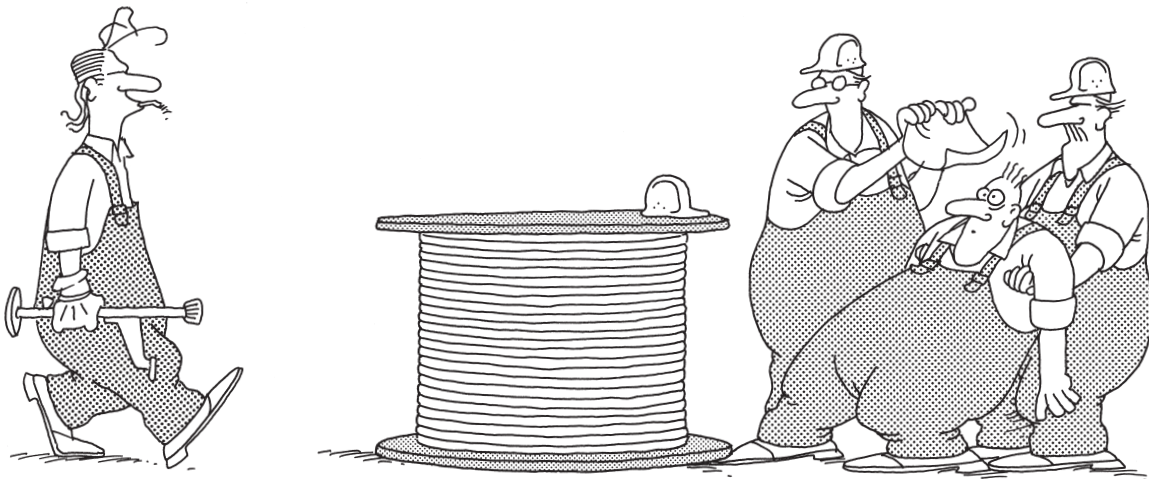
10.1. Solution: Prise en compte du coût global !

Les mauvais câbles sont moins chers que les bons. Mais vous aurez rapidement acheté trois mauvais câbles alors que vous auriez pu n'en acheter qu'un seul bon pour faire le même travail.

De plus, le transport d'un mauvais câble coûte autant que le transport d'un bon câble, l'installation d'un mauvais câble coûte autant que l'installation d'un bon câble. Mais avec un mauvais câble vous le ferez trois fois alors que vous ne le ferez qu'une seule fois avec un bon câble. Ainsi vous économisez deux fois les coûts d'installation et deux fois les pertes de productions qui peuvent être énormes.

En conséquence, en achetant directement un câble plus cher vous économisez finalement beaucoup d'argent.

On n'en a que pour son argent. Ceci est encore plus vrai pour les câbles métalliques d'appareils de levage que pour n'importe quel autre élément de machine.



Il y a une solution pour chaque problème de câble. Demandez-nous !

Les auteurs:

Dipl.-Ing. Roland Verreet
Ingenieurbüro für Fördertechnik
Wire Rope Technology Aachen
Grünenthaler Str. 40a • 52072 Aachen
Tel.: +49 241 173147
E-mail: R.Verreet@t-online.de
www.ropetechnology.com

Jean-Marc Teissier
DEP Engineering
13 rue du Béal
F-38400 Saint Martin d'Hères
Tel.: +33 4 76 62 84 54
E-mail : jmteissier@dep-engineering.fr
www.dep-engineering.fr

Ingenieurbüro für Fördertechnik

Dipl.-Ing. Roland Verreet

Grünenthaler Str. 40a • 52072 Aachen

Tel.: 0241- 173147 • Fax: 0241- 12982

Mail: R.Verreet@t-online.de

www.seile.com