

WIRE ROPE

TECHNOLOGY AACHEN



**Câbles conçus pour
enroulement multicouche**

Câbles conçus pour enroulement multicouche

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

Inhalt

1. Introduction	4
2. La fatigue en flexion	4
2.1. Flexion sur les poulies.....	6
2.2. Flexion pour un enroulement monocouche sur un tambour rainuré	6
2.3. Flexion pour un enroulement multicouche	7
3. Répartition des endommagements par fatigue en flexion	10
3.1. Répartition des endommagements [...] avec tambour monocouche	10
3.2. Répartition des endommagements [...] avec tambour multicouche	12
4. Enroulements multicouches	13
4.1. Enroulement multicouche sur tambour avec rainurage hélicoïdal.....	13
4.2. Enroulement multicouche sur tambour Lebus®	14
5. Influence du rapport D/d	16
6. Influence de la prétension du câble	18
7. Influence de la tolérance sur le diamètre du câble	21
8. Problèmes et solutions possibles.....	23
8.1. Déplacement de la zone de croisement.....	23
8.2. Aide à l'enroulement - Trancanage	25
8.3. Gestion de la tension par un système externe.....	25
8.4. Solutions par le câble	26

© 2003, 2013, 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, également partielle, uniquement avec l'autorisation des auteurs.

1. Introduction

Les câbles d'une grue correctement conçue et entretenue devraient avoir une durée de vie relativement longue. Ils seront un jour déposés à cause de la fatigue des fils, l'équivalent d'une mort naturelle pour un câble.

Mais souvent les câbles ne se font pas très vieux, ils meurent prématurément du fait d'une corrosion ou d'une usure excessive (l'équivalent pour le câble du cancer de la peau). Dans ce cas une bonne re-lubrification du câble pourrait être la réponse.

Les câbles peuvent mourir prématurément à cause de dommages structurels ou mécaniques (l'équivalent pour le câble d'être écrasé par un bus). L'amélioration de la conception des grues ainsi qu'une bonne utilisation des câbles et des grues participeront à écarter ces problèmes.

Mais qu'en est-il au sujet de l'écrasement sur le tambour? Certains câbles succombent à des blessures reçues lors des enroulements et des déroulements sur un tambour multicouche. Peut-on considérer ceci comme une mort naturelle? Beaucoup de concepteurs et d'utilisateurs de grues pensent ainsi.

Ils ont tort. Sur un tambour multicouche le câble se blesse lui-même. Il s'agit en fait d'un suicide du câble. Ce papier en explique les mécanismes et montre comment il peut être évité.

2. La fatigue en flexion

Lorsqu'un câble est sujet à des flexions répétées de petites fissures vont se former à la surface des fils, plus particulièrement au niveau du contact avec les autres fils ou avec la gorge d'une poulie ou d'un tambour. Les fissures vont augmenter avec le nombre des cycles de fatigue, réduisant ainsi la section du fil au niveau du contact. Le fil cassera dès que sa section résiduelle ne sera plus suffisante pour supporter sa part de la charge.

Une rupture en fatigue se caractérise généralement par une section rompue perpendiculaire à l'axe du câble. La figure 1 montre un câble avec des ruptures de fatigue. La figure 2 montre la section d'un fil cassé par fatigue en flexion.

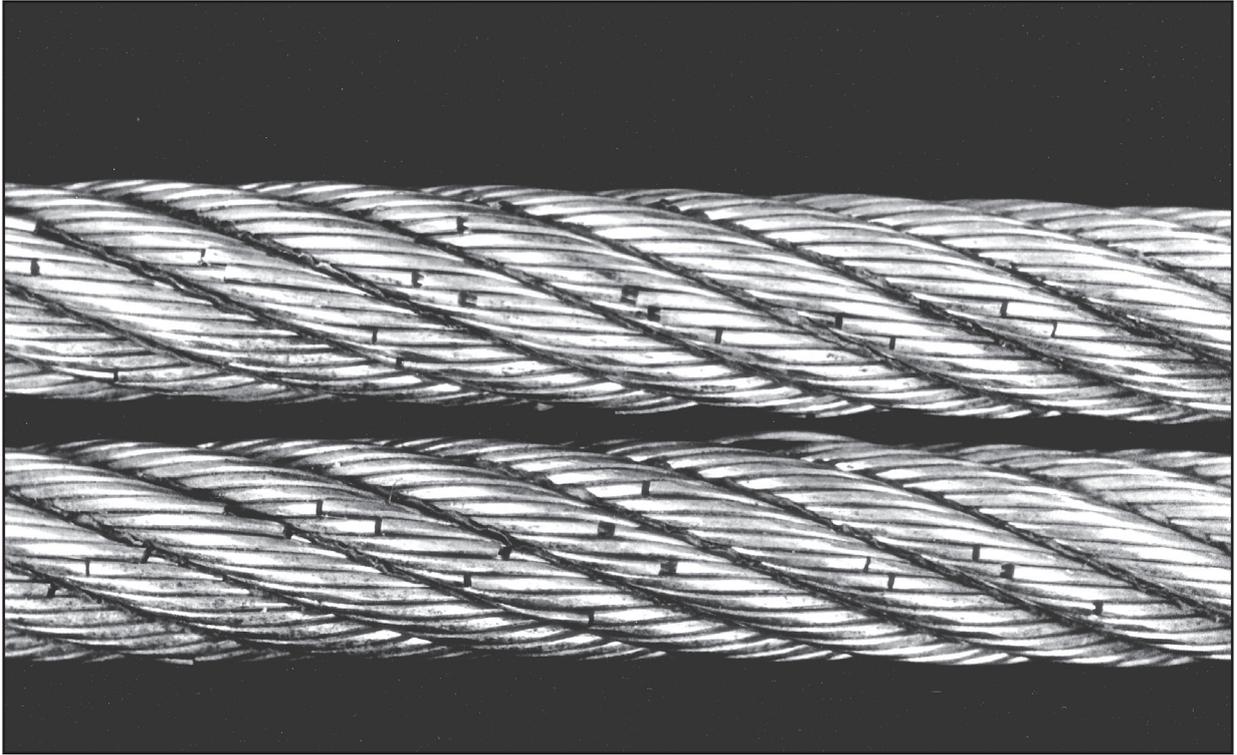


Fig. 1: Ruptures de fatigue sur un câble.

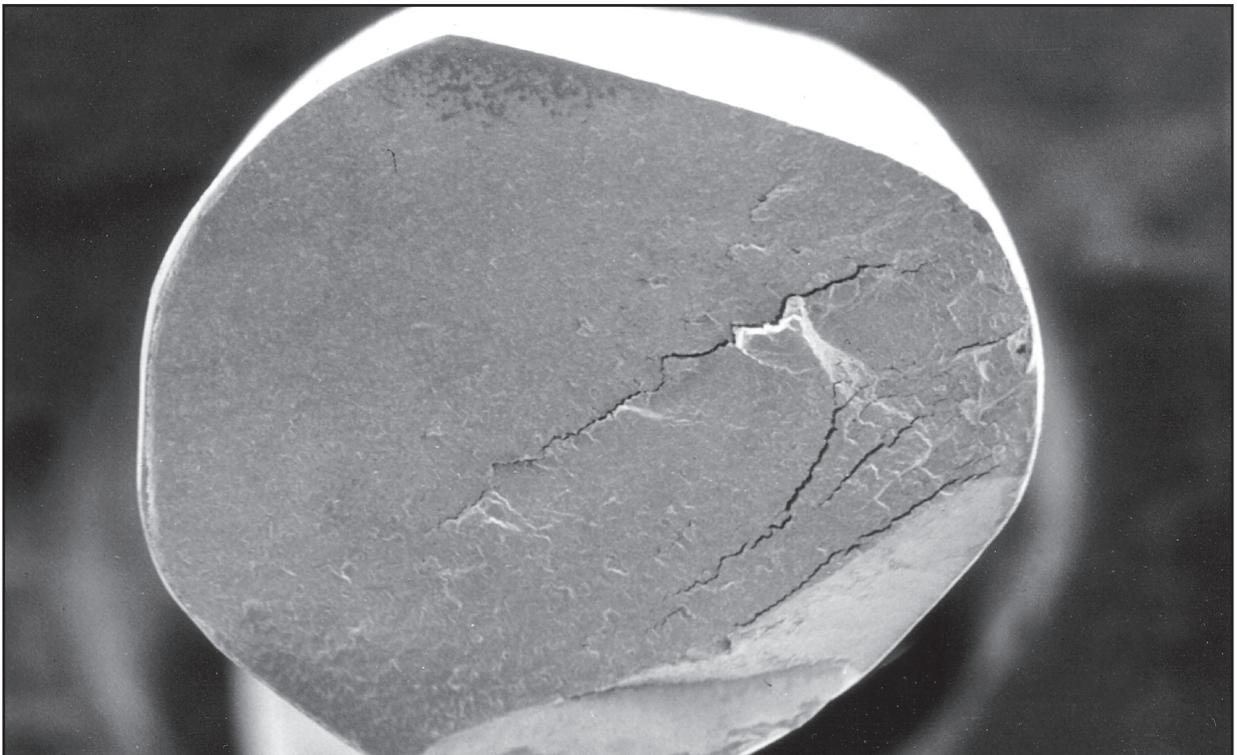


Fig. 2: Section d'un fil cassé par fatigue en flexion.

2.1. Flexion sur les poulies

Un cycle de flexion pour une section donnée d'un câble est défini soit par le passage d'une position droite à une position fléchie puis par le retour à une position droite (Figure 3a), soit par le passage d'une position fléchie à une position droite puis par le retour à une position fléchie (Figure 3b). Une section du câble subit un cycle de flexion lors de chaque passage sur une poulie. Pour un levage donné, toutes les sections du câble ne passent pas sur le même nombre de poulies ni sur le tambour.



Fig. 3: Définition d'un cycle de flexion.

Ainsi le câble se fatiguera le plus sur les sections qui passeront sur le plus grand nombre de poulies, c'est-à-dire là où il sera sujet au plus grand nombre de cycles de flexion.

2.2. Flexion pour un enroulement monocouche sur un tambour rainuré

Une portion de câble qui s'enroule en monocouche sur un tambour rainuré subira un changement d'une position droite à une position fléchie (= demi-flexion). Lors du déroulement elle subira un changement de sa position fléchie vers une position droite (= demi-flexion). Un enroulement suivi d'un déroulement génère donc également un cycle de flexion. Cependant, un cycle de flexion sur un tambour est-il comparable à un même cycle réalisé sur une poulie? La réponse est oui pour un tambour rainuré en enroulement monocouche. Les essais, de même que l'expérience de terrain, ont mis en évidence, dans la mesure où la tension et les diamètres sont les mêmes, que ce type de flexion sur un tambour génère pour le câble le même niveau de fatigue que celui généré par l'enroulement sur une poulie. Dans les deux cas le câble sera enroulé autour de surfaces courbes et lisses de géométrie similaire. On pourrait dire que le câble « ne sait pas » s'il s'enroule autour d'une poulie ou d'un tambour.

2.3. Flexion pour un enroulement multicouche

Une section de câble qui s'enroule et se déroule sur un tambour en enroulement multicouche subira, de la même manière que pour un enroulement monocouche, un changement d'une position droite à une position fléchie suivi d'un changement de cette position fléchie à une position droite. Il subira un cycle de flexion selon la définition explicitée ci-dessus, mais dans ce cas les conditions sont différentes (Figure 4): Les parties du câble enroulées sur la première couche seront bien fléchies sur la surface lisse du tambour, mais en plus lors de l'arrivée de la seconde couche elles seront compressées et endommagées en partie supérieure par cette seconde couche.

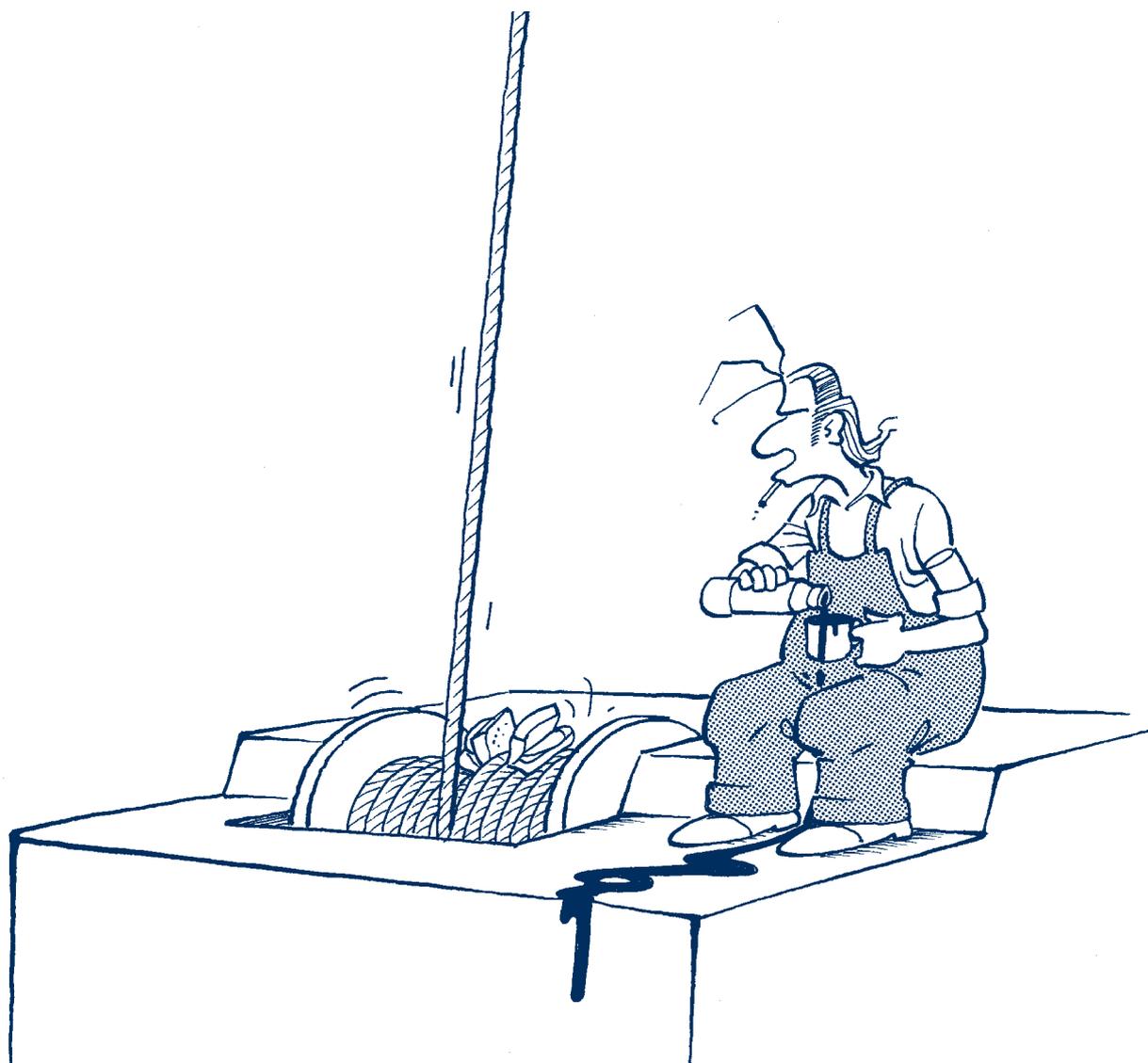


Fig. 4: Problèmes durant l'enroulement multicouche.

Les parties de câble enroulées sur la seconde couche et sur les couches supérieures seront endommagées sur tous les côtés: premièrement elles seront endommagées en zone A du fait du contact avec la spire voisine lors de l'entrée sur le tambour (Figure 5).

Elles seront ensuite enroulées autour d'une surface très grossière constituée par la couche inférieure de câble, ce qui conduira à l'endommagement des fils en zones B1 et B2 (Figure 6).

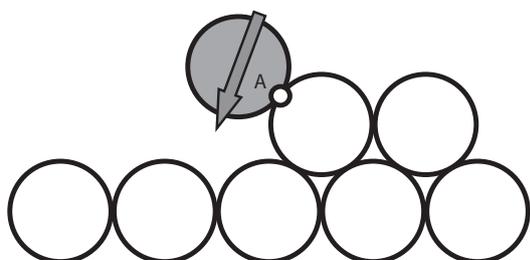


Fig. 5: Premier endommagement

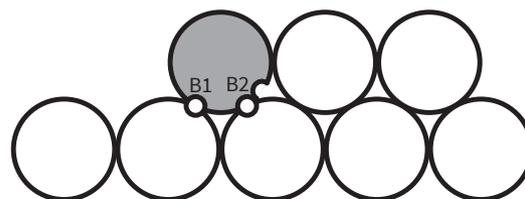


Fig. 6: Deuxième endommagement

La spire suivante arrivera alors et endommagera le câble en Zone C (Figure 7). De plus elle forcera un léger déplacement du câble, ce qui conduira à des dommages additionnels en zones B1 et B2.

Finalement la couche suivante endommagera le câble des deux côtés (en zones D1 et D2) (Figure 8), ou bien sur le sommet dans les zone de changement de spire.

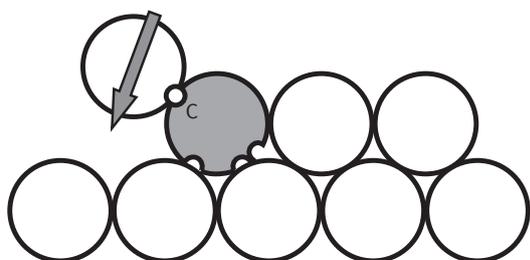


Fig. 7: Troisième endommagement

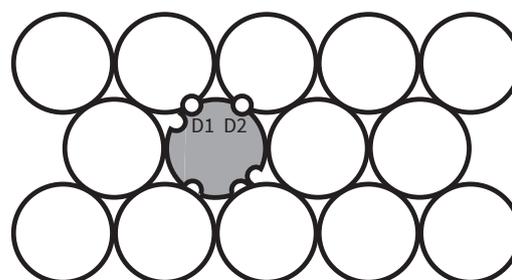


Fig. 8: Quatrième endommagement

Il apparaît clairement que du fait de ces phénomènes les sections du câble seront notoirement plus endommagées que lors d'une flexion sur un enroulement monocouche (Figure 9). Mais combien de fois plus?

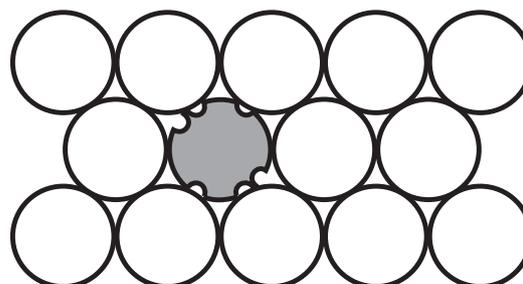


Fig. 9: Situation finale

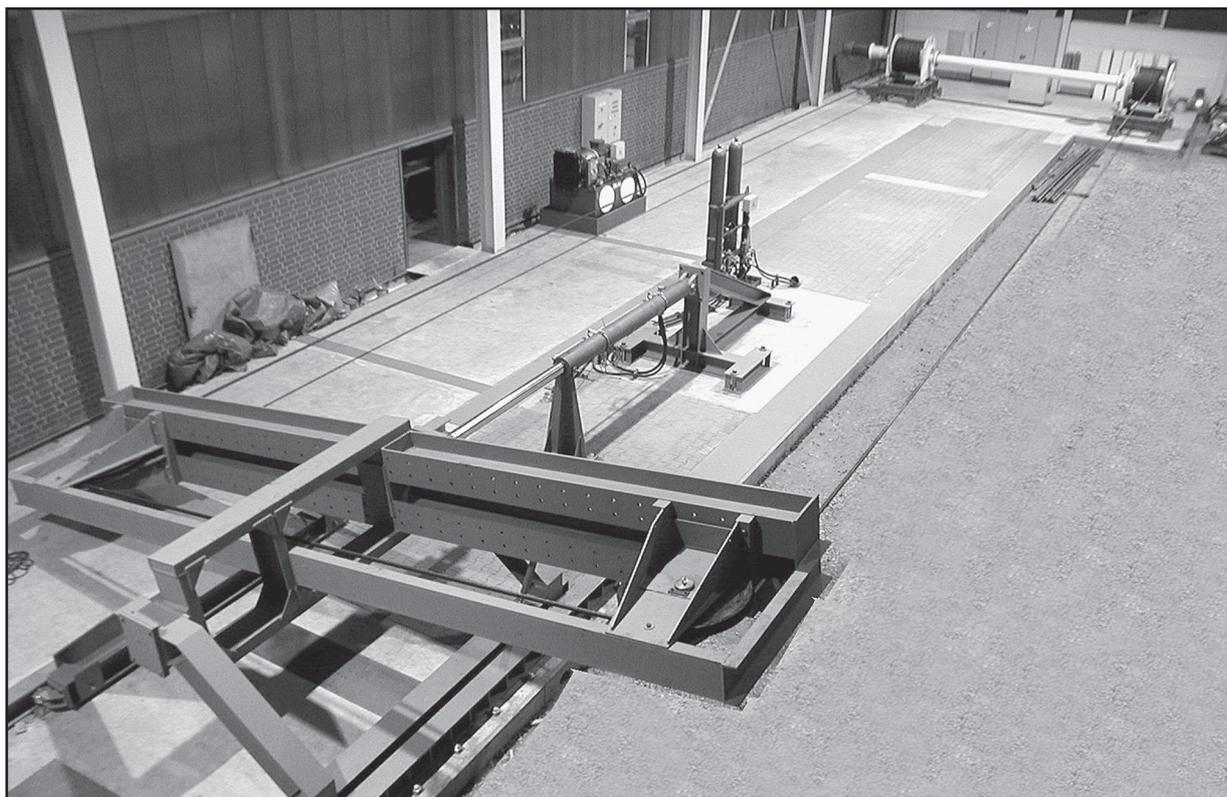


Fig. 10: Station d'essais pour enroulement multicouche. Deux tambours avec enroulement multicouche sont visibles dans le fond. Le câble se déroule d'un tambour pour s'enrouler sur l'autre tambour via les poulies du système de tension (45T) que l'on voit en premier plan. Cette unité de tension qui translate et pivote permet également de faire varier les angles de déflexion entre le câble et les tambours.

Les auteurs ont conçu la première machine au monde destinée à l'analyse de ce phénomène (Figure 10).

Définissons le facteur d'endommagement en enroulement multicouche comme étant le quotient du nombre de cycles de flexion (jusqu'au critère de dépose) pour un enroulement monocouche ou sur une poulie par le nombre de cycles de flexion (jusqu'au critère de dépose) pour un enroulement multicouche. Les résultats des premiers essais réalisés sur la station d'essais montrent (de façon surprenante) que le facteur d'endommagement augmente avec le coefficient de sécurité, c.à.d. quand la tension diminue.

La figure 11 montre l'évolution du facteur d'endommagement multicouche en fonction du coefficient de sécurité du câble. Sur la base des premiers résultats et pour un D/d d'environ 25 ce facteur d'endommagement (ou facteur de suicide) s'établit approximativement de la façon suivante :

$$\text{Facteur d'endommagement multicouche} = 2.85 + 0,65 \cdot \text{Coefficient de sécurité}$$

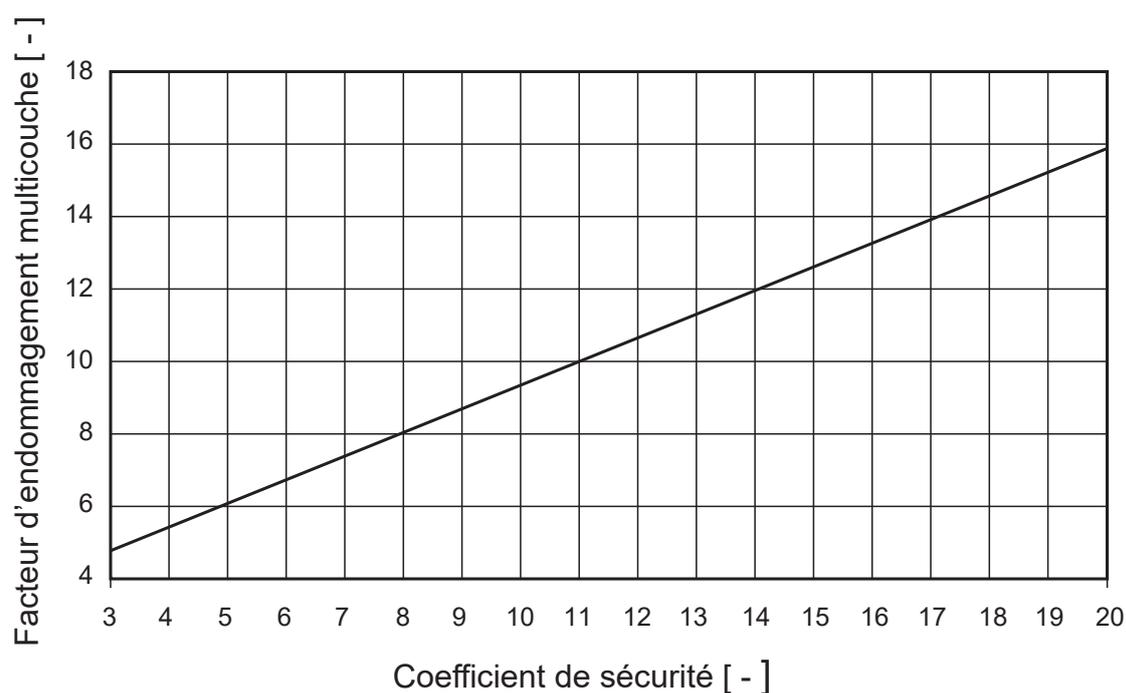


Fig. 11: Facteur d'endommagement multicouche en fonction du coefficient de sécurité du câble

3. Répartition des endommagements par fatigue en flexion

Pendant un cycle de levage type toutes les sections de câble ne vont pas passer sur le même nombre de poulies ou de tambours. Le câble cassera dans la zone qui sera la plus endommagée. Cette zone pourra être différente pour un système de levage avec enroulement monocouche et multicouche.

3.1. Répartition des endommagements pour système de levage avec tambour monocouche

Sans connaître ses conditions d'utilisation, il n'est pas possible de prédire la répartition des endommagements de fatigue en flexion, même pour une simple grue avec un mouflage quatre brins et un tambour.

Nous admettons que la grue prend une charge à la position la plus basse du crochet (Figure 12a), la lève jusqu'à la position la plus haute du crochet (Figure 12b) puis la redescend à la position de départ. La figure 12 montre des contre-flexions seulement pour la clarté du dessin.

La figure 13 montre la répartition des cycles de flexion générés par cette opération. Le plus grand nombre de cycles de flexion n'apparaît pas sur le brin le plus rapide, celui qui va au tambour, mais sur l'extrémité opposée. Ils s'accumulent sur les brins les plus lents qui restent dans le mouflage et n'atteignent jamais le tambour.

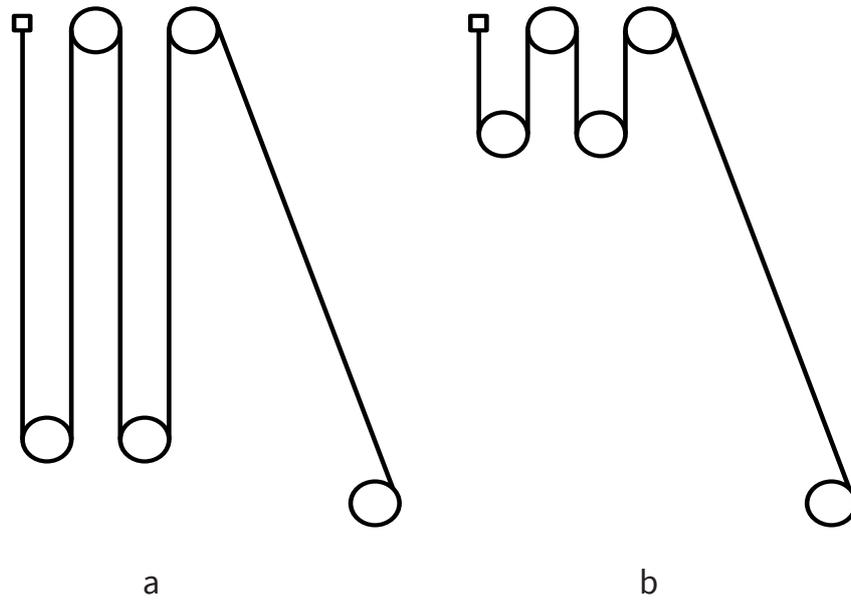


Fig. 12: Configuration de la grue ; crochet en position basse (a) et en position haute (b)

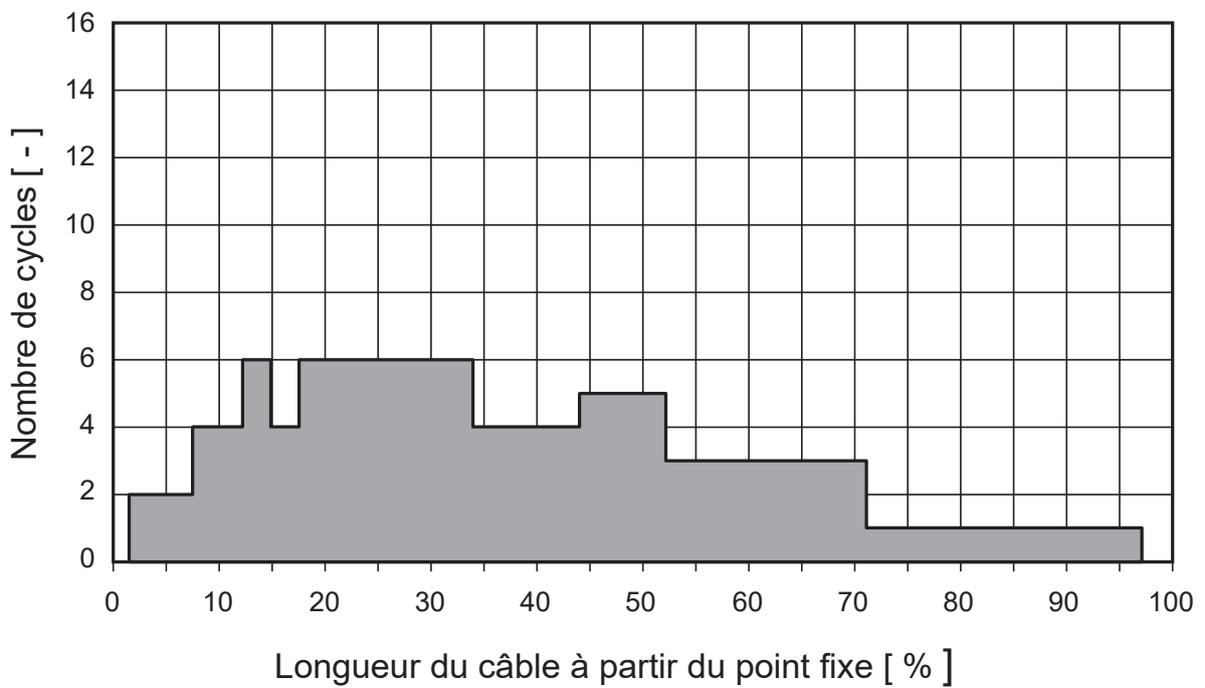


Fig. 13: Répartition du nombre de cycles de flexion le long du câble (enroulement monocouche)

La répartition du nombre de cycles de flexion pourra être totalement différente si la même grue lève des charges sur des hauteurs aléatoires. Il sera alors très difficile de déterminer la zone la plus sollicitée. Elle ne devrait cependant pas se situer dans une portion de câble qui s'enroule sur le tambour.

3.2. Répartition des endommagements pour système de levage avec tambour multicouche

Si la grue évoquée ci-dessus est équipée d'un treuil avec enroulement multicouche, chaque flexion sur le tambour sera beaucoup plus sollicitante que pour un enroulement sur un tambour monocouche ou sur une poulie. Compte tenu des résultats des essais évoqués ci-dessus (voir figure 11), cette amplification sera de 4 à 16 si le coefficient de sécurité évolue entre 3 et 20 en fonction de la charge transportée. Quand on cumule les cycles de flexion, chaque flexion sur le tambour doit être multipliée par le facteur d'endommagement multicouche. Cela change significativement la répartition des cycles de flexion à prendre en compte pour le calcul de l'endommagement.

A titre d'exemple, la figure 14 montre la répartition des cycles de flexion pour la grue ci-dessus avec un facteur d'endommagement multicouche de 10. Nous constatons que la portion de câble qui supporte le plus grand nombre de cycles de flexion fait maintenant partie de la longueur de câble qui s'enroule sur le tambour.

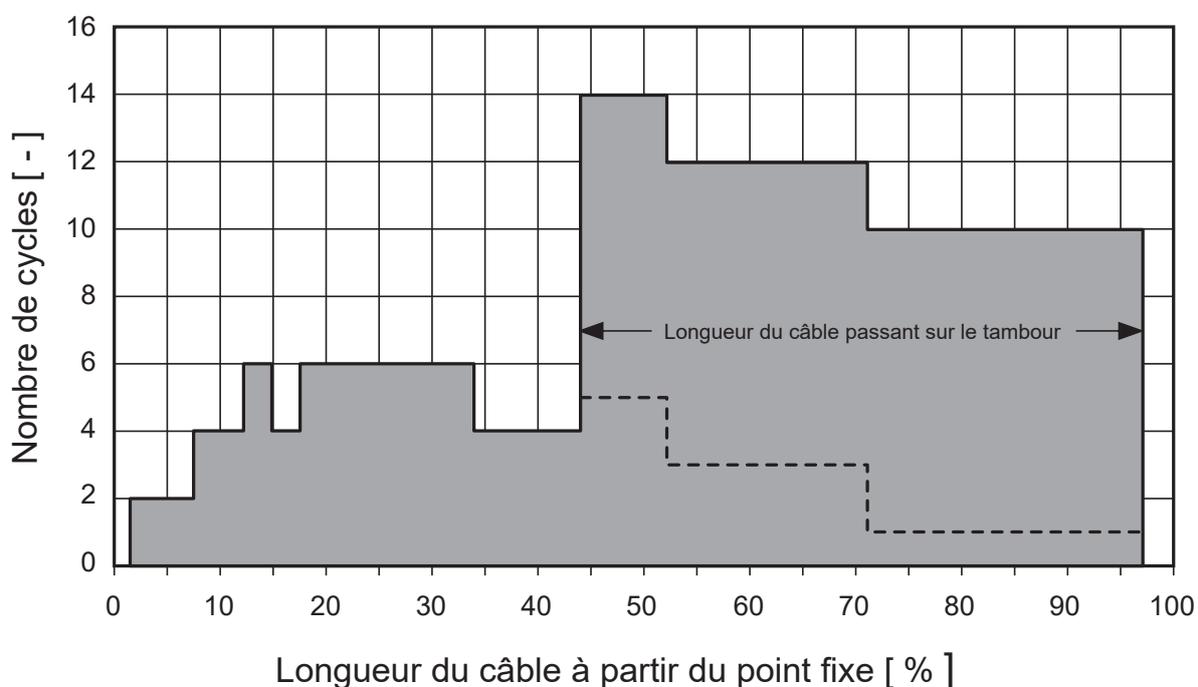


Fig. 14: Répartition du nombre de cycles de flexion le long du câble (enroulement multicouche)

4. Enroulements multicouches

4.1. Enroulement multicouche sur tambour avec rainurage hélicoïdal

Sur un tambour avec rainurage hélicoïdal, le câble est supposé s'enrouler d'une flasque à l'autre selon une parfaite hélice, monter sur la seconde couche puis retourner en direction de son point d'entrée en s'enroulant de nouveau selon une parfaite hélice (Figure 15).

Le câble va en fait se comporter de façon totalement différente (Figure 16): après s'être enroulé selon une parfaite hélice sur la première couche, le câble va évoluer en direction de la seconde couche, s'appuyant sur la flasque jusqu'à ce qu'il croise une spire de la première couche et bascule dans la « vallée » voisine créée par deux spires de la couche inférieure. Il va suivre ce rainurage qui va dans la mauvaise direction jusqu'à être basculé hors de son « lit » par le brin qui monte de la première à la seconde couche. Il va ainsi croiser un autre brin et basculer de nouveau dans une « vallée » voisine créée par deux spires de la première couche. Ce processus va aller en se répétant, le câble s'enroulant en zigzag autour du tambour.

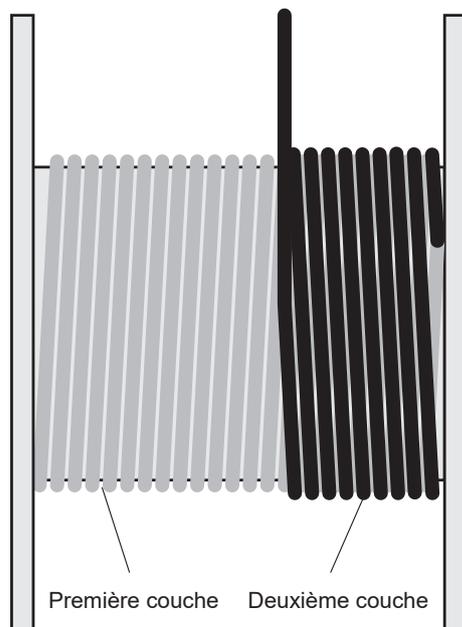


Fig. 15: Enroulement théorique sur un tambour à rainurage hélicoïdal

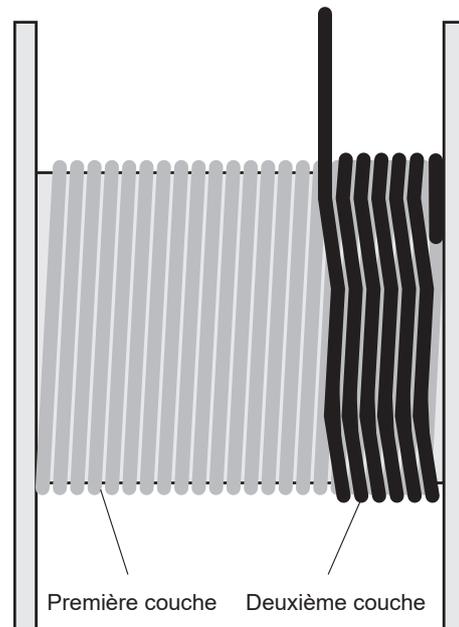


Fig. 16: Enroulement réel sur un tambour à rainurage hélicoïdal

Pour chaque révolution du tambour le câble va :

- être poussé sur le côté sur une distance correspondant à un diamètre de câble ($=-1d$),
- s'enrouler dans la mauvaise direction et se déplacer sur le côté sur une distance correspondant à un demi-diamètre de câble ($=+1/2d$).
- être poussé sur le côté sur une distance correspondant à un diamètre de câble ($=-1d$)
- s'enrouler dans la mauvaise direction et se déplacer sur le côté sur une distance correspondant à un demi-diamètre de câble ($=+1/2d$).

Ceci conduit à $-1d + 1/2d - 1d + 1/2d = -1d!!$

Ainsi sur la seconde couche le câble se déplace finalement d'une distance correspondant à un diamètre de câble pour chaque révolution du tambour! Mais cela ne pourrait-il pas être mieux fait?

4.2. Enroulement multicouche sur tambour Lebus®

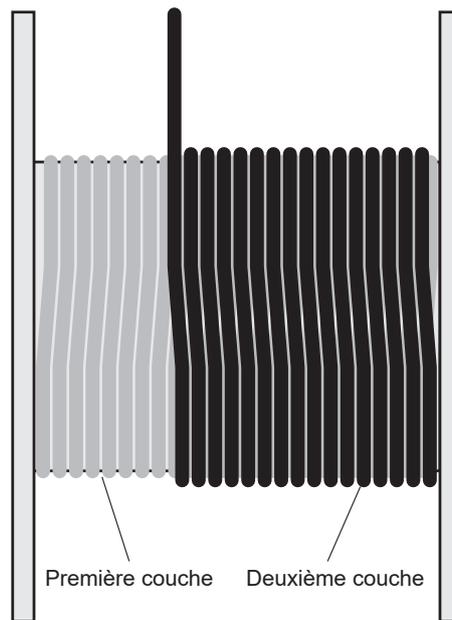
Lebus® améliora significativement l'enroulement multicouche en éliminant l'hélice sur la première couche. Sur un tambour Lebus® le câble s'enroule dans un premier temps parallèlement à la flasque, puis se déplace sur le côté, guidé par le rainurage du tambour, d'une valeur correspondant à un demi-diamètre de câble (Figure 17). Ensuite il s'enroule de nouveau parallèlement à la flasque jusqu'à ce qu'il soit une nouvelle fois guidé sur le côté (exactement diamétralement opposé au premier décalage) et qu'il se déplace sur une distance correspondant à un demi-diamètre de câble.

Ainsi, sur la première couche, lors de chaque révolution du tambour, le câble va :

- s'enrouler parallèlement à la flasque ($= +/- 0 d$).
- se déplacer sur le côté sur une distance correspondant à un demi-diamètre de câble ($= + 1/2 d$).
- s'enrouler parallèlement à la flasque ($= +/- 0 d$), et
- se déplacer sur le côté sur une distance correspondant à un demi-diamètre de câble ($= + 1/2 d$).

Ceci conduit à : $\pm 0 d + 1/2 d \pm 0 d + 1/2 d = + 1 d!!$

Par conséquent, le câble avance réellement d'un diamètre de câble pour chaque révolution du tambour. Le réel avantage de l'enroulement Lebus® se situe toutefois au niveau de la seconde couche et des suivantes.

Fig. 17: Tambour Lebus[®]

Après avoir atteint la seconde couche le câble s'enroule parallèlement à la flasque jusqu'à ce qu'il croise la dernière spire de la première couche exactement à l'endroit où celle-ci se déplace d'une valeur correspondant à un demi-diamètre pour finalement toucher la flasque. Après avoir croisé cette spire le câble va tomber de l'autre côté, se déplaçant ainsi une nouvelle fois sur une distance correspondant à un demi-diamètre de câble. L'histoire va se répéter ainsi à chaque demi-révolution du tambour.

Ainsi, sur la seconde couche, lors de chaque révolution du tambour, le câble va :

- s'enrouler parallèlement à la flasque ($= +/- 0 d$).
- être poussé sur le côté sur une distance correspondant à un demi-diamètre de câble ($= + 1/2 d$).
- s'enrouler parallèlement à la flasque ($= +/- 0 d$), et
- être poussé sur le côté sur une distance correspondant à un demi-diamètre de câble ($= + 1/2 d$).

Ceci conduit à : $\pm 0 d - 1/2 d \pm 0 d - 1/2 d = - 1 d!!!$

Sur la seconde couche le câble se déplace finalement d'une distance correspondant à un diamètre de câble pour chaque révolution du tambour! Mais où est la différence avec le tambour à rainurage hélicoïdal, sur lequel la seconde couche était également poussée sur le côté de façon répétée?

Il faut analyser les chiffres : Sur un tambour hélicoïdal, chaque fois que le câble est poussé sur le côté, il l'est d'une valeur correspondant à un diamètre entier de câble. Sur le tambour Lebus® le déplacement n'est que d'une valeur correspondant à un demi-diamètre de câble.

Les zones dans lesquelles le câble est poussé sur le côté sont appelées zones de croisement, car le câble y croise la spire de la couche inférieure. La figure 18 montre un câble enroulé dans les zones parallèles d'un tambour Lebus®. La figure 19 montre le câble entrant dans la zone de croisement.

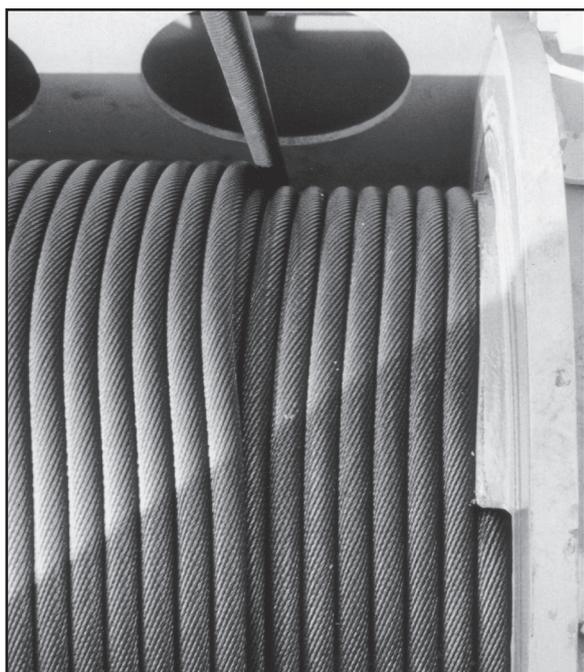


Fig. 18: Tambour Lebus®, enroulement en zone parallèle

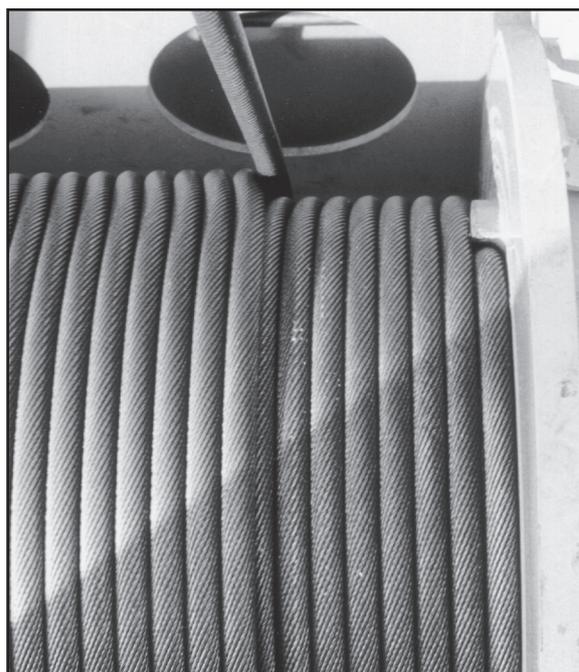


Fig. 19: Tambour Lebus®, enroulement en zone de croisement

5. Influence du rapport D/d

L'influence du rapport D/d (rapport entre le diamètre du tambour et le diamètre nominal du câble) sur l'endommagement du câble n'a pas encore fait l'objet de beaucoup d'analyses. Le retour d'expérience laisse toutefois penser que l'endommagement du câble augmente considérablement si le rapport D/d diminue. Du fait de la raideur du câble les rapports d'enroulement D/d inférieurs à 20 doivent être évités par tous les moyens, spécialement si le câble doit s'enrouler sur les couches inférieures sous de faibles tensions.

La Fig. 20 montre un tambour avec enroulement sur deux couches pour un rapport D/d faible. La largeur du tambour génère des angles de déflexion contraignants, ce qui conduit à un mauvais enroulement. La Fig. 21 montre les tambours pour enroulement multicouche d'une grue moderne. Le rapport D/d est d'environ 20 sur la première couche.

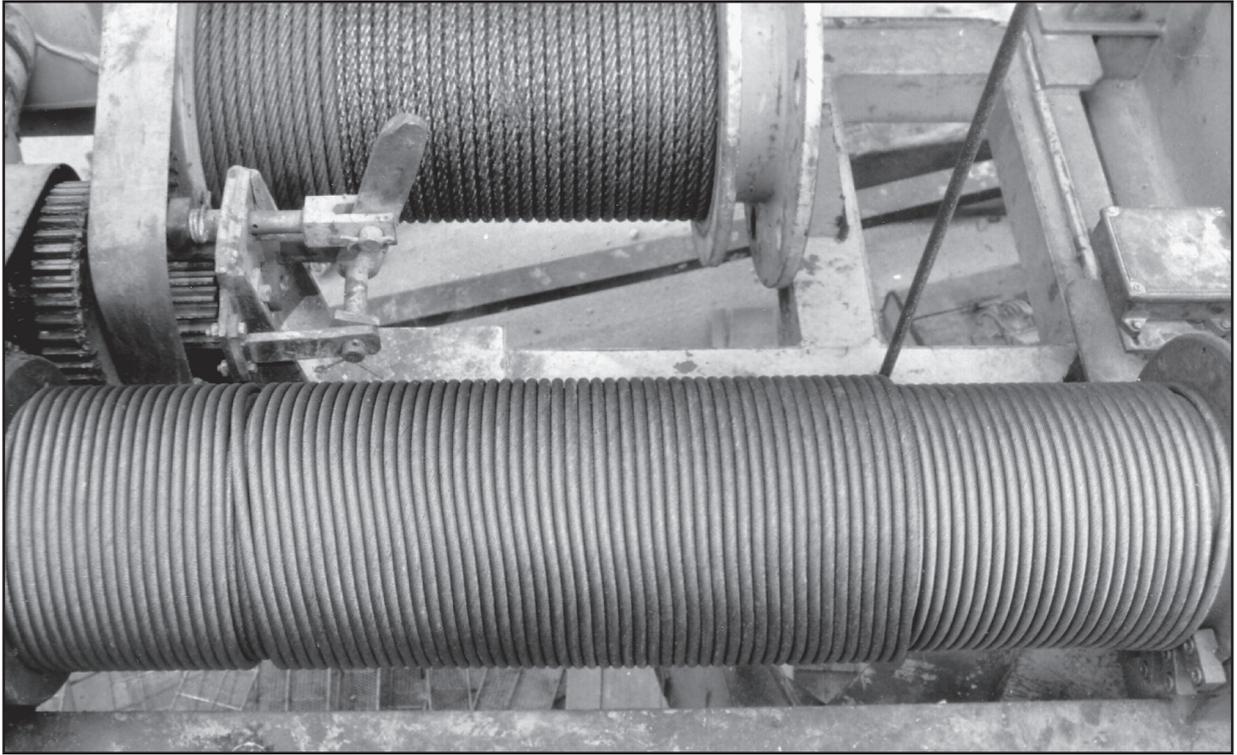


Fig. 20: La pire des solutions : petit diamètre, grande largeur

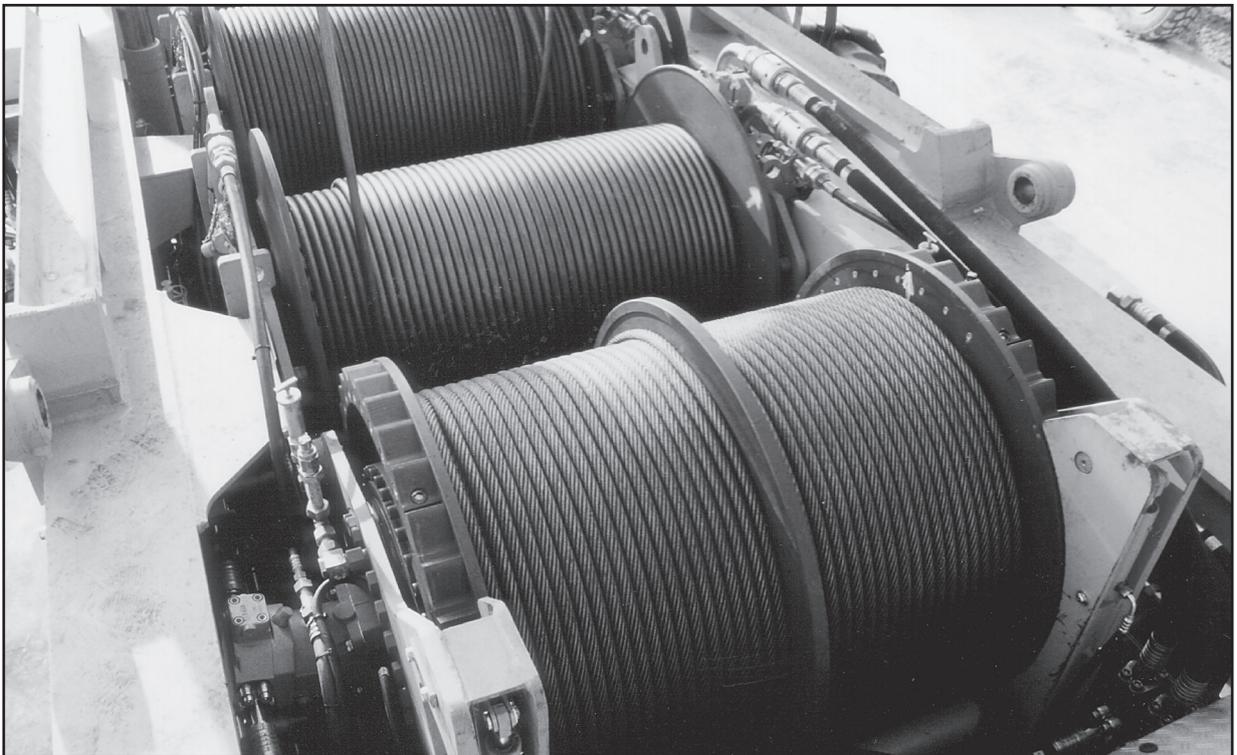


Fig. 21: Les grues modernes fonctionnent avec des rapports D/d compris entre 20 et 30.

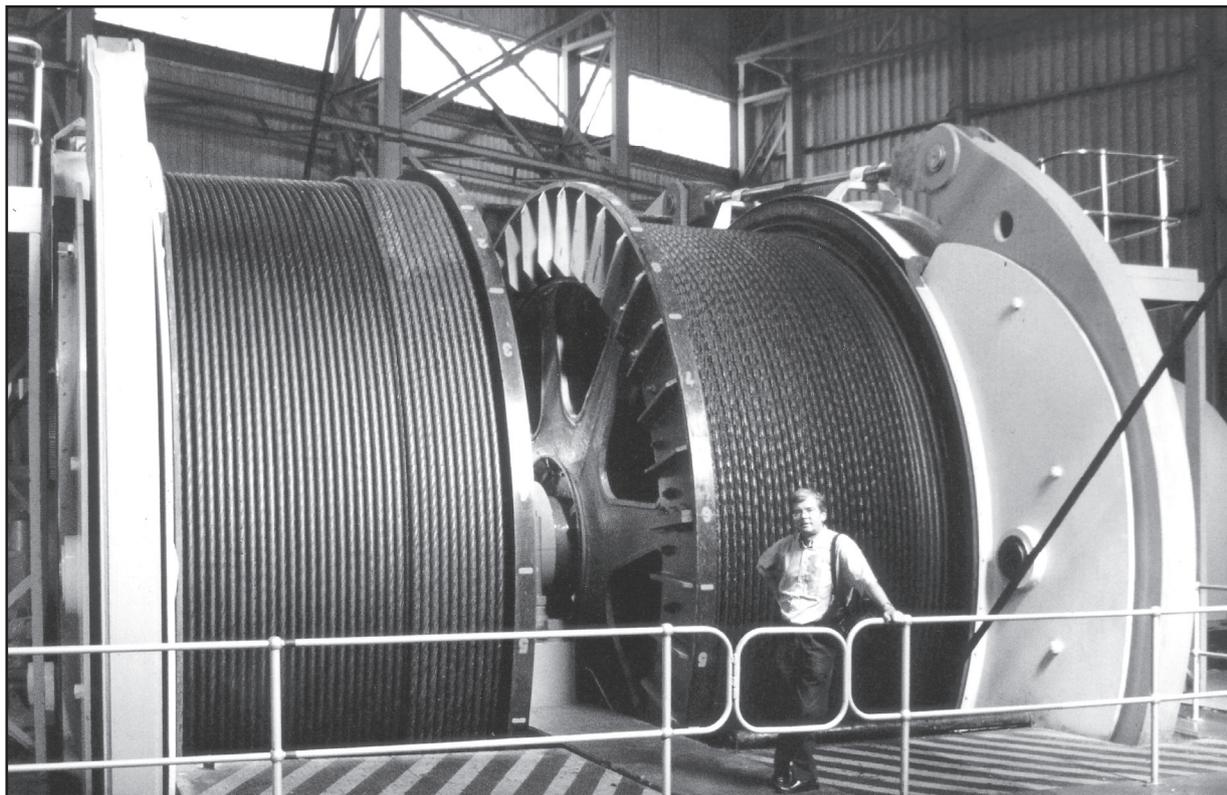


Fig. 22: Les tambours des machines d'extraction de mines ont des rapports D/d supérieurs à 100

La figure 22 montre un des auteurs devant une unité de levage à deux tambours située en Afrique du Sud. Des rapports D/d supérieurs à 100 réduisent considérablement l'endommagement du câble causé par l'enroulement multicouche. Ils autorisent également des vitesses de déplacement élevées.

6. Influence de la prétension du câble

Si les couches inférieures n'ont pas été enroulées sur le tambour sous forte tension, les spires de ces couches seront déplacées sous l'action du câble entrant sur le tambour, qui pourra alors glisser à l'intérieur des autres couches, créant ainsi d'importants dommages au câble.

Ce phénomène est particulièrement marqué pour les enroulements multicouches sur des tambours lisses. La figure 23 montre la pyramide des forces sur un tambour lisse. Si les couches inférieures ne sont pas suffisamment tendues, le câble entrant va glisser autour du tambour (en essayant de resserrer les spires voisines) et en même temps va s'infiltrer au travers des couches inférieures (Figure 24).

Les figures 25 et 26 montrent les conséquences d'un manque de pré-tension (lors de l'enroulement initial) : ce câble n'a effectué qu'une seule opération en charge sur la seconde couche.

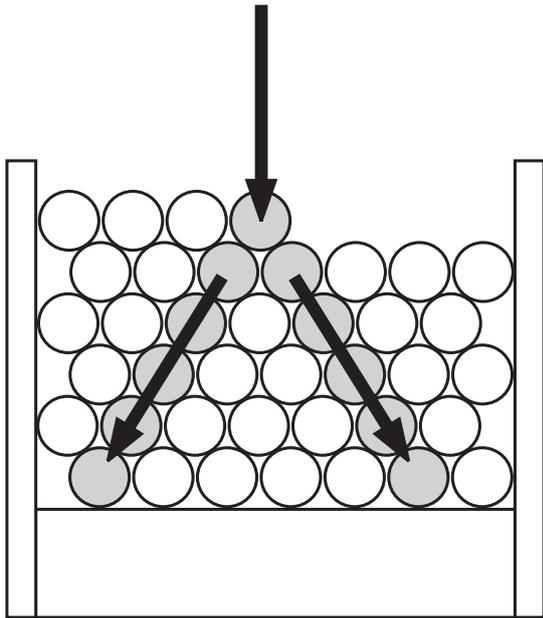


Fig. 23: Pyramide des forces

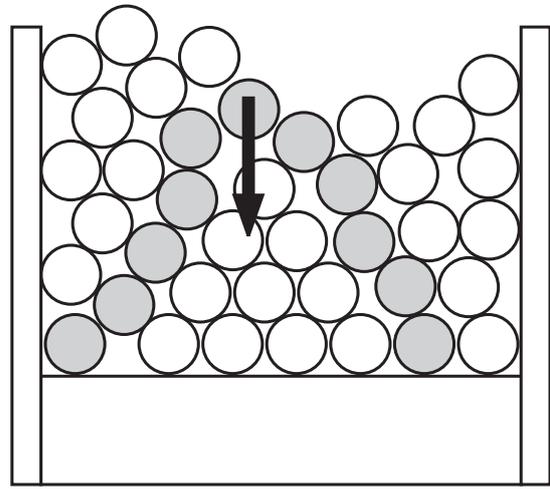


Fig. 24: Effondrement de la pyramide et infiltration du câble



Fig. 25: D'importants mouvements relatifs ont détruit le câble lors de la première opération.



Fig. 26: Conséquences d'une interpénétration entre les couches.

Outre le fait que le conducteur de la grue ne se rendra pas forcément compte de la pénétration du câble dans les couches inférieures sur le tambour, il pourra même cacher le problème en enroulant deux couches supplémentaires. Ensuite il tournera sa grue et descendra la charge. Lors de ce mouvement l'interpénétration des spires pourra agir comme un point fixe (dans le cas où le câble de ressortirait pas) et conduire à une brusque inversion du sens de déplacement de la charge alors que le tambour tournera toujours dans le même sens. Il en résultera un choc important qui endommagera significativement le câble et pourrait même le rompre. La figure 27 montre un câble coincé dans les couches inférieures.

La pyramide des forces montrée en figure 28 est stable : Le tambour est rainuré afin de stabiliser la couche inférieure, les espaces entre les spires externes et les flasques sont remplis par des cales qui aideront le câble à monter de la première sur la seconde couche et les couches inférieures sont prétendues.

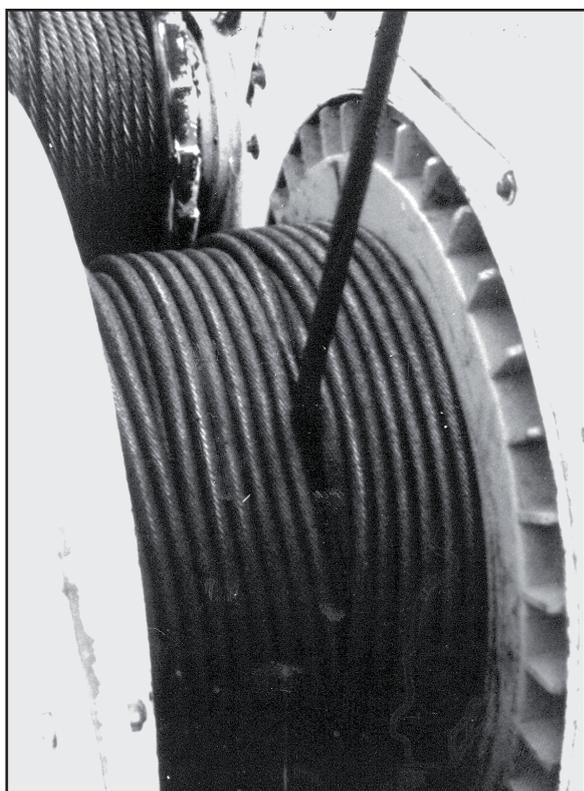


Fig. 27: Câble coincé dans les couches inférieures

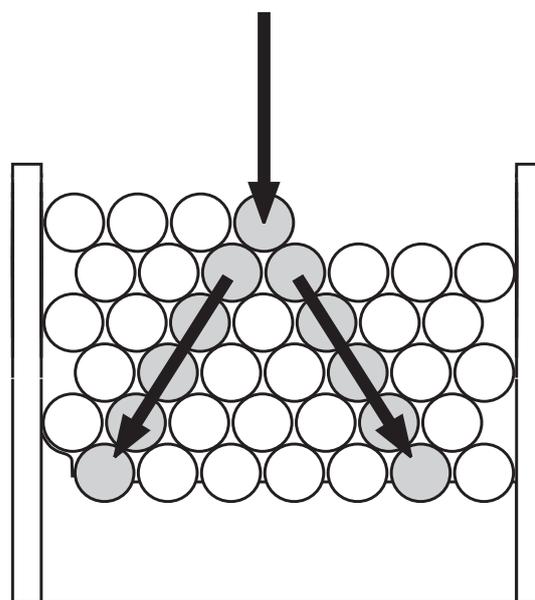


Fig. 28: Agencement correct du tambour.

7. Influence de la tolérance sur le diamètre du câble

Sur la première couche et dans les sections parallèles des couches suivantes, indépendamment du diamètre réel du câble, le câble sera guidé par le rainurage du tambour ou par les brins de câble de la couche inférieure. Cependant, dans les zones de croisement il ne sera guidé que par le brin voisin. Si le diamètre du câble correspond au pas du tambour, les croisements interviendront dans une zone parallèle à l'axe du tambour (Figure 29).

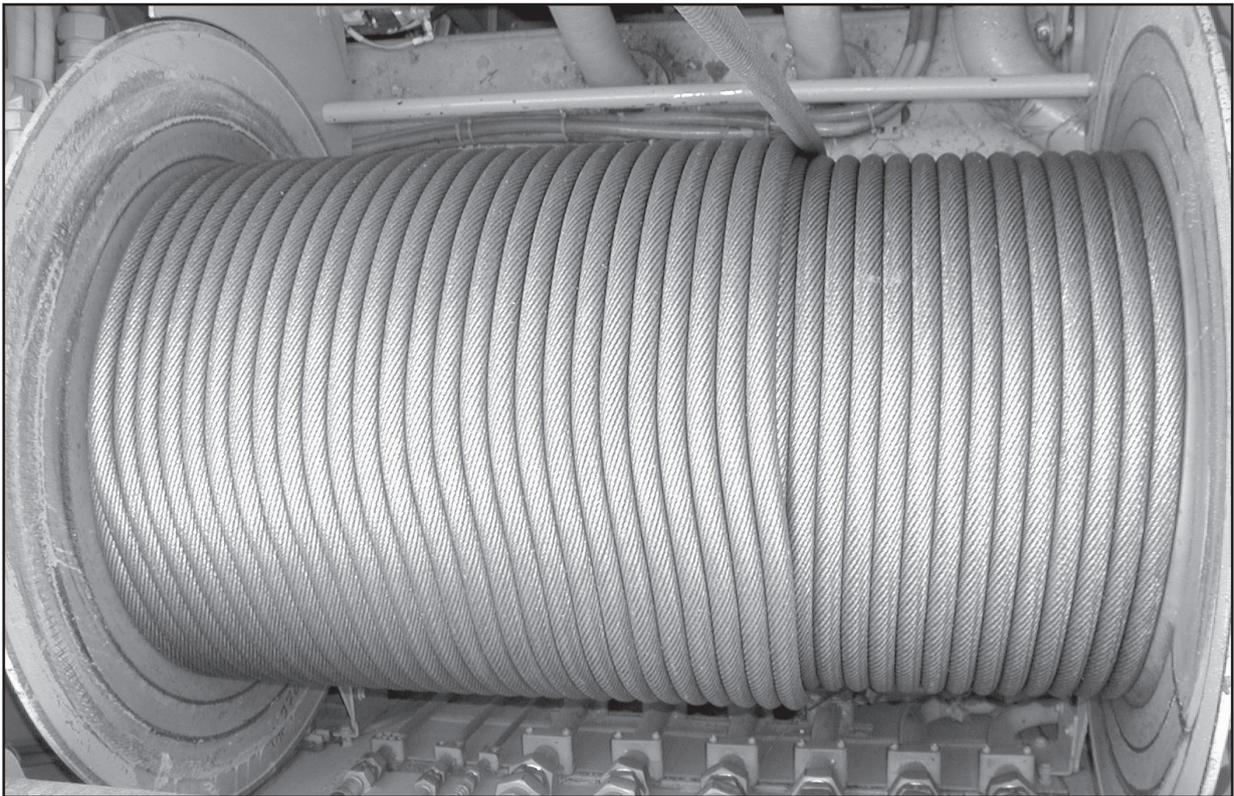


Fig. 29: Bon diamètre de câble : La zone de croisement est parallèle à l'axe du tambour.

Toutefois, si le diamètre du câble est trop petit, la seconde spire s'enroulera un peu plus loin que prévu avant d'être poussée sur le côté par la première spire. La troisième spire va de nouveau s'enrouler un peu plus loin que la seconde avant d'être poussée sur le côté par cette dernière. Etc. La zone de croisement sera par conséquent inclinée par rapport à l'axe du tambour (Figures 30 et 31). La couche suivante n'acceptera pas les points de croisement définis par la précédente, spire par spire elle déplacera cette zone de croisement. Il en résultera des endommagements importants du câble dans cette zone (Figures 30 et 31).

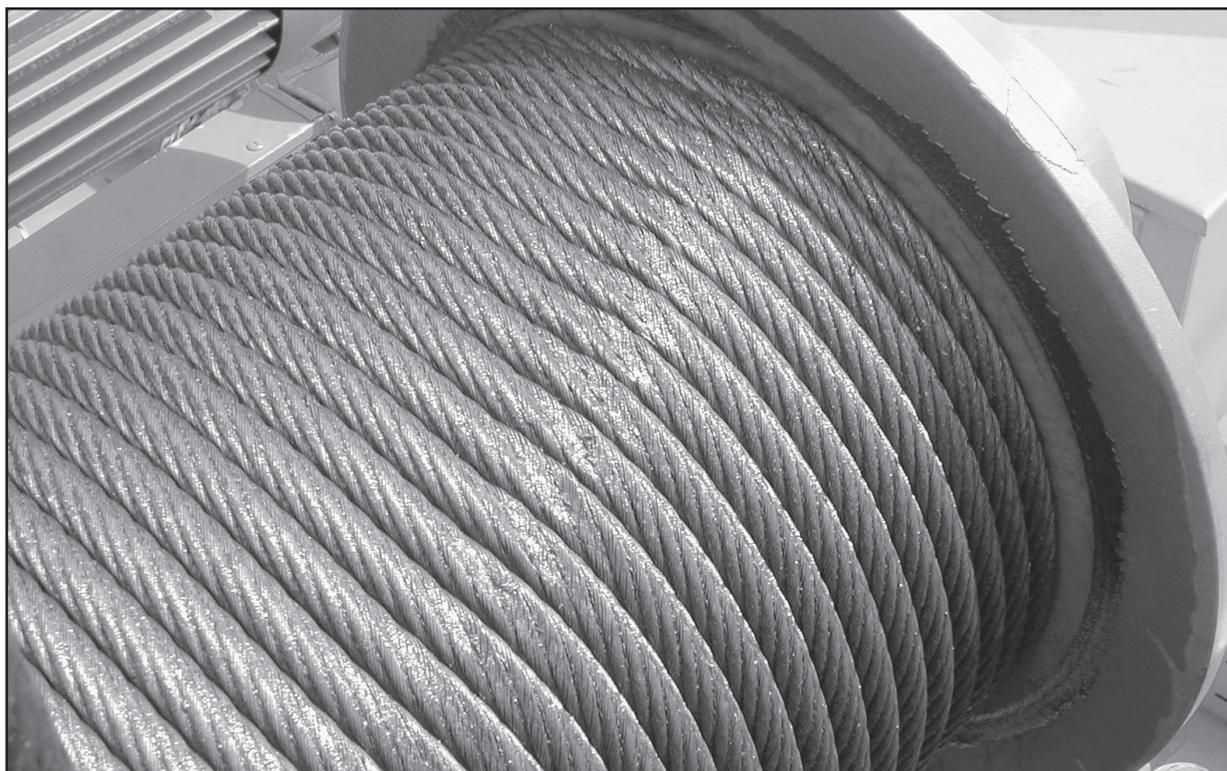


Fig. 30: Diamètre de câble trop petit : La zone de croisement est inclinée par rapport à l'axe du tambour (causant d'importants dommages au câble).

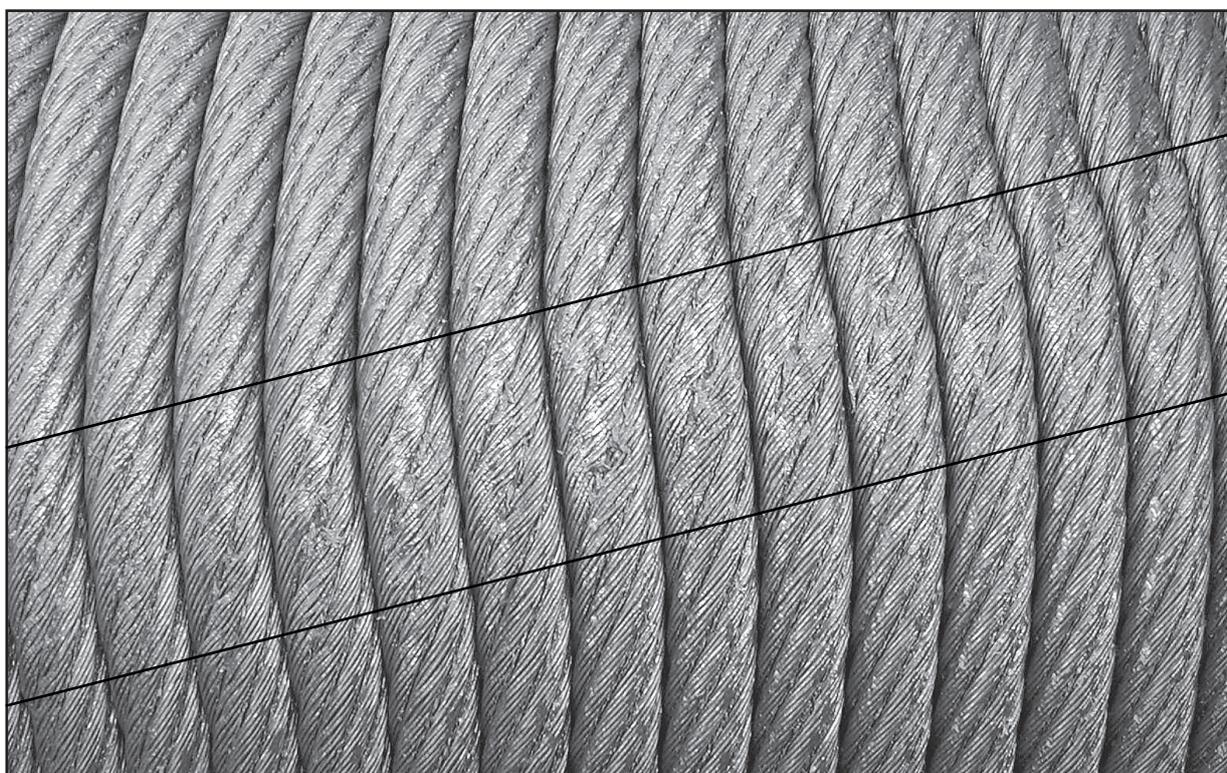


Fig. 31: Diamètre de câble trop petit : Dommages causés par le déplacement de la zone de croisement.

Si par contre le diamètre du câble est trop grand, la seconde spire s'enroulera un peu moins loin que prévu avant d'être poussée sur le côté par la première spire. La troisième spire va de nouveau s'enrouler un peu moins loin que la seconde avant d'être poussée sur le côté par cette dernière. Etc. Il en résultera une zone de croisement inclinée dans le sens opposé

L'intervalle de tolérance sur le diamètre du câble est normalement de 5%. La norme ISO 2408, par exemple, autorise des diamètres allant du nominal -1% au nominal +5% pour des câbles de diamètre 8 mm et plus. Cet intervalle devra être réduit à 2% pour obtenir un bon enroulement sur tambour multicouche.

Les tambours à rainurage spécial (type Lebus[®]) ont typiquement un pas de rainurage de $\pm 1,04 \div 1,05$ fois le diamètre nominal du câble.

L'intervalle de tolérance du câble est limité à 2% (diamètre nominal +2% à diamètre nominal +4%)

8. Problèmes et solutions possibles

8.1. Déplacement de la zone de croisement

Comme explicité ci-dessus, même avec un câble parfait et un tambour sophistiqué, le câble devra être poussé sur le côté par la spire voisine deux fois par révolution du tambour. Ceci conduira inévitablement à un endommagement du câble. Le problème est que cet endommagement est concentré sur la zone de croisement. La figure 32 montre une section de câble située sur une zone de croisement (Zone A de la figure 5) d'un câble testé sur le banc d'essais conçu par les auteurs (Figure 10).

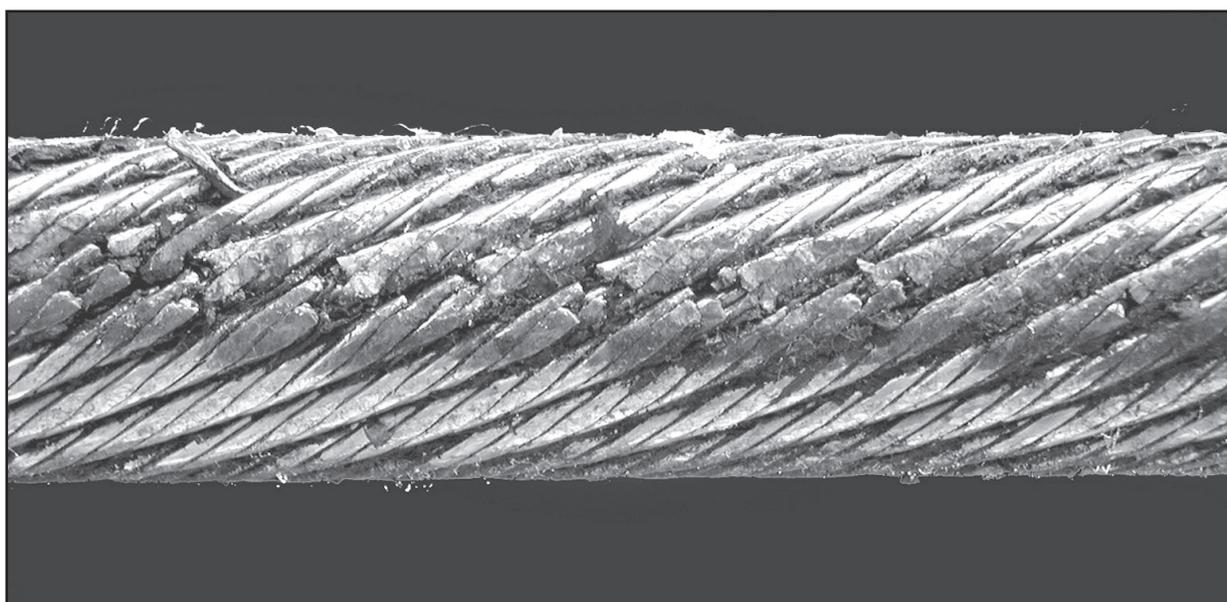


Fig. 32: Endommagement typique d'une zone de croisement

Heureusement, cet endommagement est cependant localisé à des intervalles réguliers: il y aura toujours une petite zone endommagée suivie par une grande zone intacte, elle-même suivie par une petite zone endommagée, etc.... Il y a donc la possibilité d'étaler les endommagements en coupant sur l'extrémité du câble côté tambour une longueur de câble légèrement plus longue de la zone endommagée. Cette opération devra être conduite bien avant que le critère de dépose du câble ne soit atteint (Figure 33).

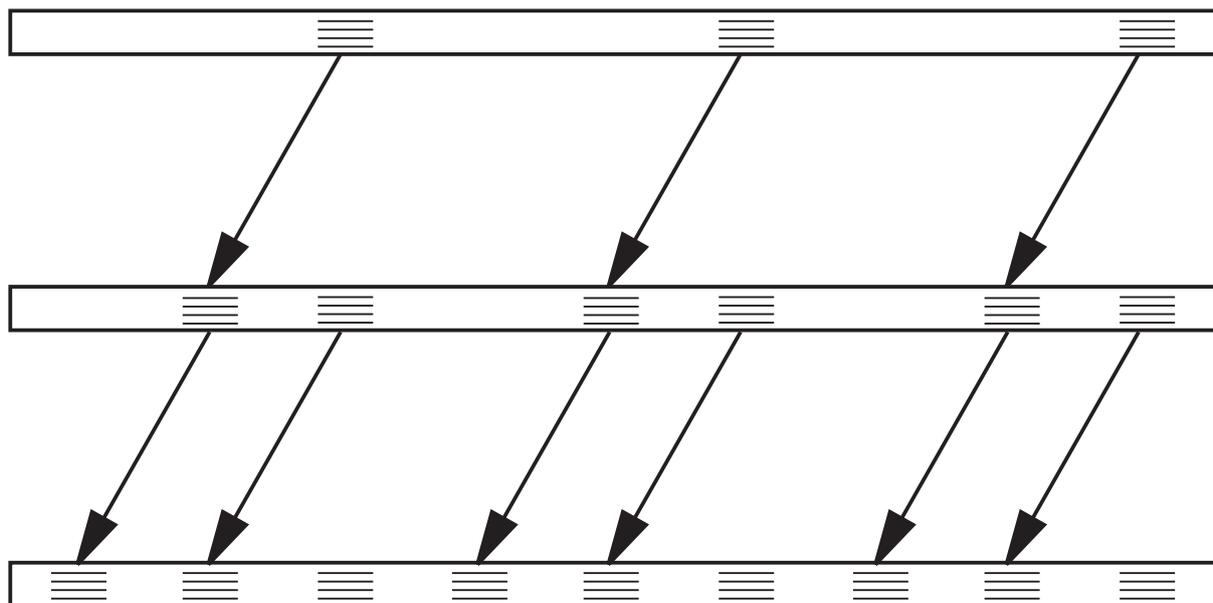


Fig. 33: Déplacement des zones endommagées sur le tambour

De ce fait, les portions abîmées du câble seront déplacées en dehors des zones de croisement sur le tambour, vers les zones d'enroulement parallèles beaucoup plus confortables. Des portions de câbles pratiquement pas abîmées se trouveront alors dans les zones de croisement. Cette action permet facilement de doubler, voire de tripler la durée de vie du câble.

8.2. Aide à l'enroulement - Trancanage

Comme explicité ci-dessus, sur un enroulement multicouche le câble est détruit du fait de l'appui contre la spire précédente. Un système de trancanage guidera le câble pendant l'enroulement, lui évitant ainsi de se frotter régulièrement sur la spire voisine.

Il faut cependant que ce système soit calibré en fonction du diamètre effectif du câble. Un système mal ajusté pourrait conduire au résultat inverse de celui escompté. Il pourrait mettre en appui permanent le câble entrant contre la spire précédente, conduisant ainsi à la destruction du câble en un temps très court. Il faut de plus garder à l'esprit que le diamètre du câble diminuera dans le temps!

Un fabricant de grues de renom a breveté un système pour lequel c'est le câble qui se déplace par rapport au tambour, mais le tambour qui se déplace par rapport au câble. Pendant l'enroulement du câble en zone parallèle le tambour est fixe. Juste avant que le câble touche la spire voisine dans la zone de croisement, le tambour se décale d'un demi diamètre de câble afin d'éviter ce contact.

8.3. Gestion de la tension par un système externe

Les auteurs ont développé en 2011 un système qui permet d'optimiser la tension dans le câble pour une utilisation sur un tambour multicouche.

Au lieu d'aller directement sur le tambour multicouche, le câble passe d'abord au travers d'un système de traction linéaire, par exemple un cabestan, qui optimise la tension dans le câble (Figure 34).

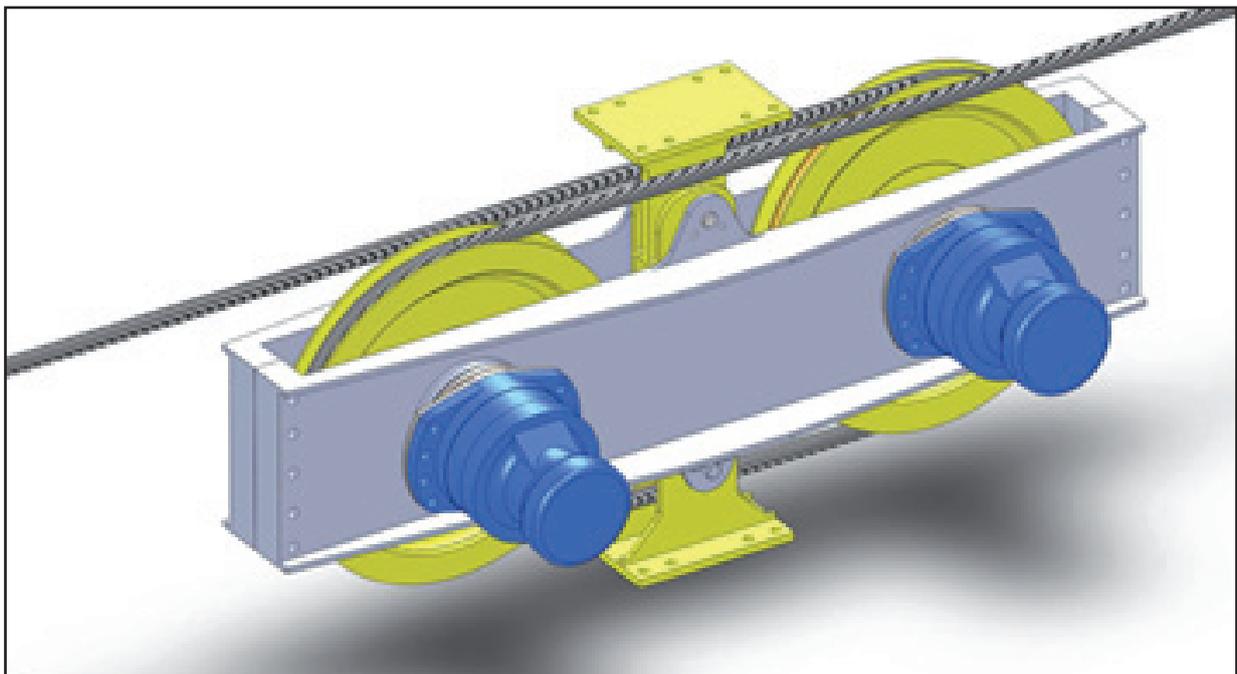


Fig. 34: Cabestan installé devant le tambour multicouche

Comme explicité ci-dessus il est très néfaste pour le câble d'entrer sur le tambour multicouche sous charge maximale. Prenons par exemple le cas d'un facteur de suicide de 10. Dans ce cas chaque zone du câble qui entre sur le tambour subit l'équivalent de 5 cycles de flexion sous charge maximale.

Si au contraire le câble traverse d'abord un cabestan à deux poulies munies de garniture Becorit®, la tension pourra être réduite de 80% avant que le câble n'entre sur le tambour. Par conséquent le câble subira un cycle de flexion sous charge maximale sur la première poulie du cabestan, puis un second cycle sous 40% de la tension maximum sur la seconde poulie du cabestan. Sur le tambour il fera un demi cycle de flexion sous une charge correspondant à seulement 20% de la tension maximale, et n'aura donc un endommagement correspondant à l'équivalent de moins de deux cycles de flexion sous charge maximale. La durée de vie du câble sera donc plus que deux fois supérieure à celle qu'aurait le même câble sur un enroulement multicouche traditionnel.

L'installation d'un système de traction linéaire devant le tambour présente également d'autres avantages.

Comme explicité ci-dessus les couches inférieures sur le tambour doivent être enroulées sous une tension minimum afin de garantir la stabilité de la pyramide de câble.

La configuration d'un enroulement du câble sous le poids du crochet seul et du déroulage du câble sous charge maximum est le cas critique pas excellence. Le système évoqué ci-dessus peut dans ce cas être utilisé pour créer de la tension dans le câble lors de l'enroulement du câble sans charge sous le crochet.

Ce système permet donc soit de réduire la tension dans le câble quand elle est trop grande, soit d'augmenter cette tension quand elle est trop faible.

8.4. Solutions par le câble

Nous avons vu que, lors de son écrasement sur le tambour, le câble n'est pas attaqué par d'autres objets que par lui-même. L'enroulement sur un tambour multicouche génère le martelage d'une portion de câble à surface non lisse faite de vallées (entre deux torons) et de montagnes (sommets des torons) par une autre portion du même câble ayant la même géométrie. L'écrasement sur le tambour est réellement l'équivalent d'un suicide du câble. Comment pouvons-nous prévenir une telle autodestruction?

8.4.1. Solution 1 : Câbles Lang

Les expérimentations ont, par le passé, déjà montré que les câbles Lang (Figure 35) se comportent beaucoup mieux que les câbles croisés (Figure 36) pour les enroulements multicouches. En effet les fils extérieurs de deux spires en contact ne seront jamais en situation « d'engrènement », ce qui conduirait inévitablement à une destruction mutuelle.

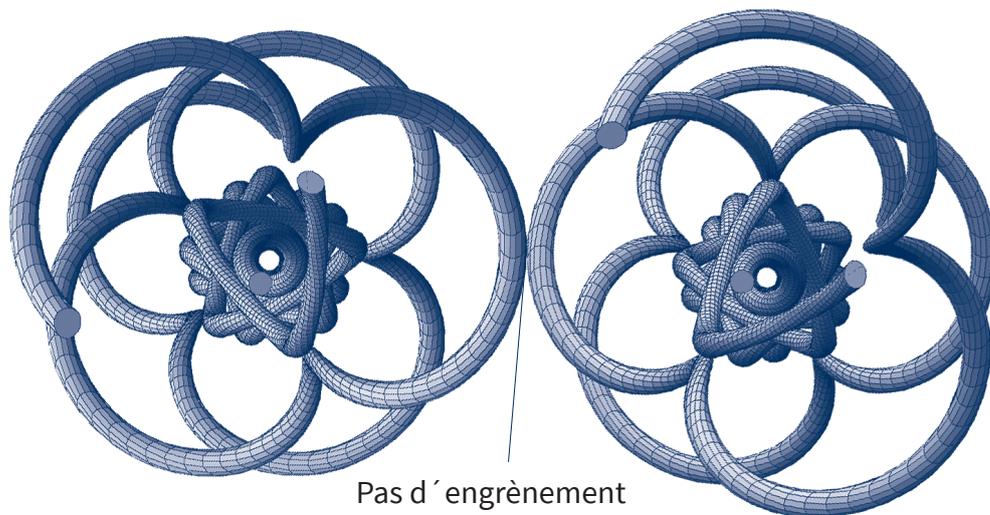


Fig. 35: Câbles Lang: Pas d'engrènement

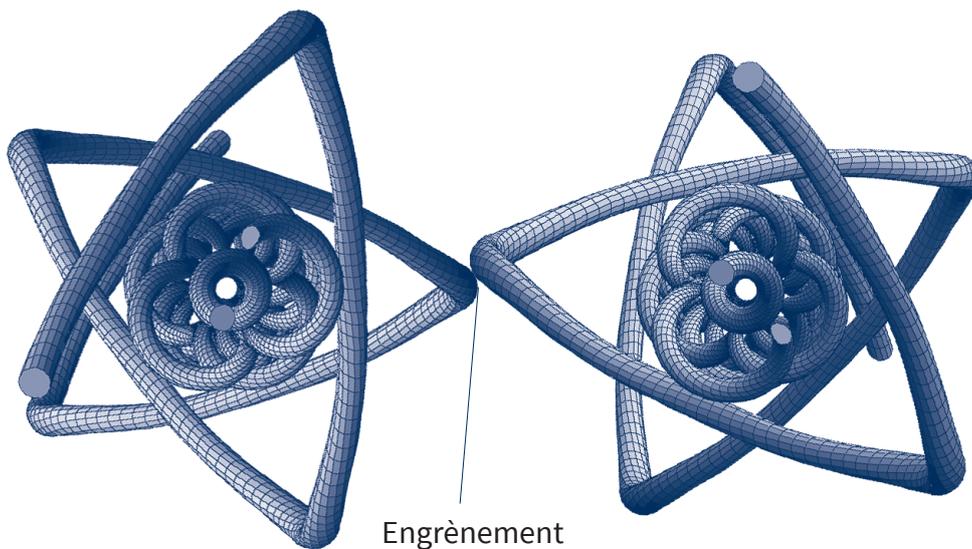


Fig. 36: Câbles croisés: Engrènement

8.4.2. Solution 2 : 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 (Figure 37) ont un diamètre 42% plus grand que ceux d'un toron Warrington-Seale 36 (Figure 38). 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 Warrington-Seale 36, mais qui cela intéresse-t-il si le problème relève de l'écrasement sur le tambour et non de fatigue à l'enroulement?

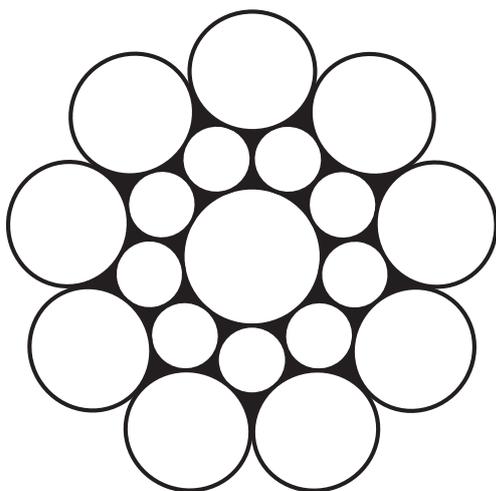


Fig. 37: Toron Seale 19 : conception très robuste

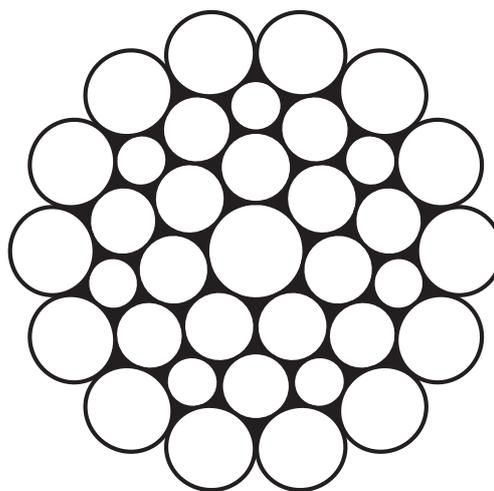


Fig. 38: Toron Warrington – Seale 36, conception très performante en fatigue de flexion.

8.4.3. Solution 3 : 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 (Figure 39). Par contre, si les torons extérieurs du câble sont compactés (Figure 40), les « engrènements » entre les fils extérieurs ne sont plus possibles. Par conséquent les endommagements sont grandement réduits.

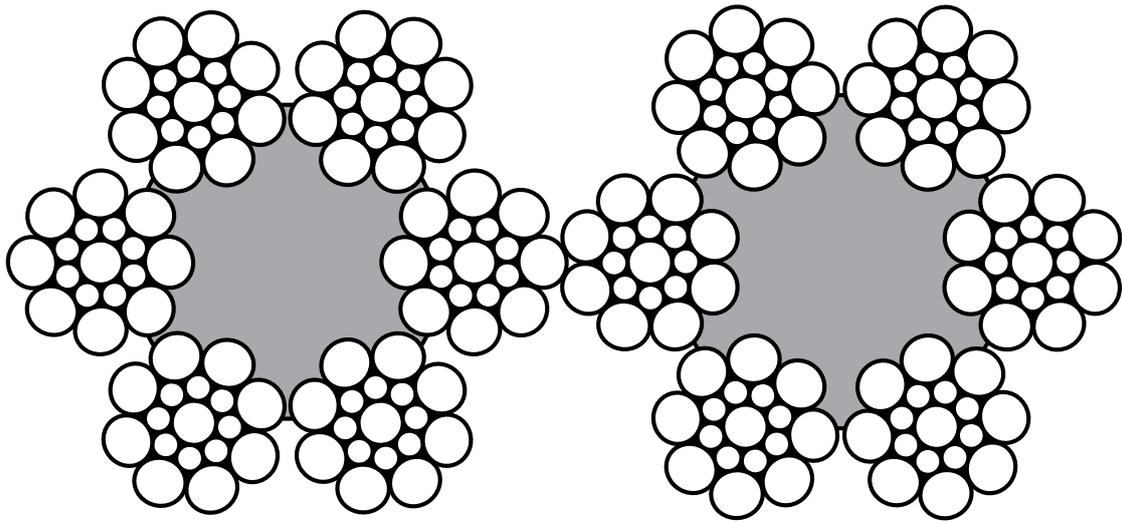


Fig. 39: Torons extérieurs conventionnels : permettent « l'engrènement » entre fils extérieurs

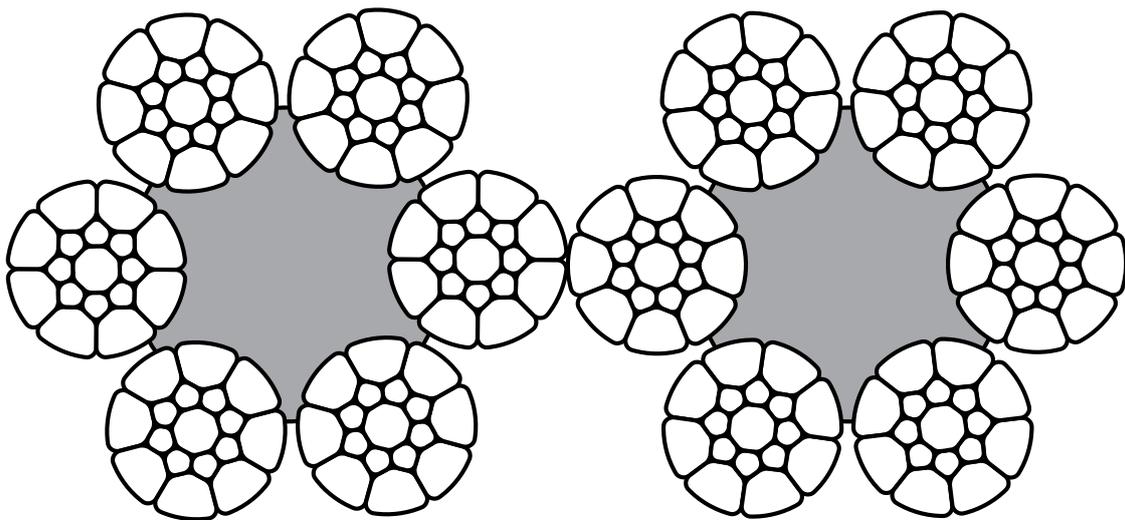


Fig. 40: Torons extérieurs compactés : préviennent « l'engrènement » entre fils extérieurs

8.4.4. Solution 4 : Câbles martelés

Comme nous l'avons vu plus haut, 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. Il serait donc logique de rendre la surface extérieure du câble plus lisse afin de réduire les endommagements. La section des câbles métalliques est souvent présentée comme étant ronde. Mais il n'en est rien.

Selon le nombre de torons extérieurs d'un câble, sa section ressemble plus à un hexagone ou à un octogone qu'à un cercle. L'enchaînement de monts et vallées le long de la circonférence du câble est la cause principale des problèmes discutés ci-dessus! Donc, afin d'écartier ces problèmes, il faut vraiment faire un câble parfaitement rond.

En martelant des câbles à l'aide d'une machine rotative il est possible d'obtenir des produits parfaitement ronds avec une surface extérieure extrêmement lisse. La figure 41 montre un câble, avant le martelage (haut) puis dans deux différents degrés de martelage et donc de réduction de diamètre.

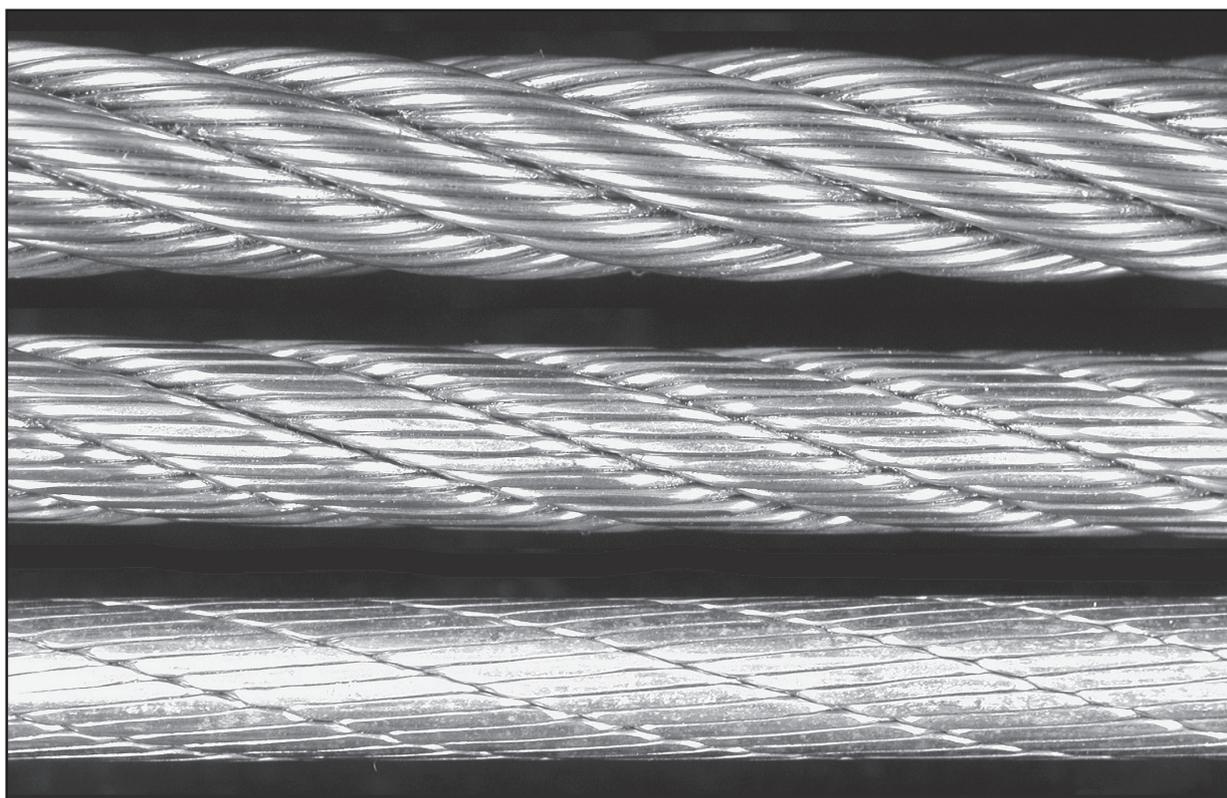


Fig. 41: Un câble avant martelage (haut), après martelage (réduction typique, milieu) et après martelage (réduction sévère, bas).

Ces avantages se payent par des endommagements des fils intérieurs. Un des auteurs a inventé et fait breveter un processus qui résout ce problème. Une couche plastique située entre les torons extérieurs et l'âme métallique du câble non seulement survit au processus de martelage, mais en plus réduit les risques d'endommagement de la partie intérieure du câble (Figure 42). Les câbles plastifiés martelés ont été testés sur les machines de fatigue en flexion et sur la station d'essais pour enroulement multicouche (Figure 10). Les résultats sont très encourageants : sur la station d'essais pour enroulement multicouche les câbles martelés ont obtenu des durées de vie en moyenne trois fois supérieure à celle ces câbles équivalents non martelés.

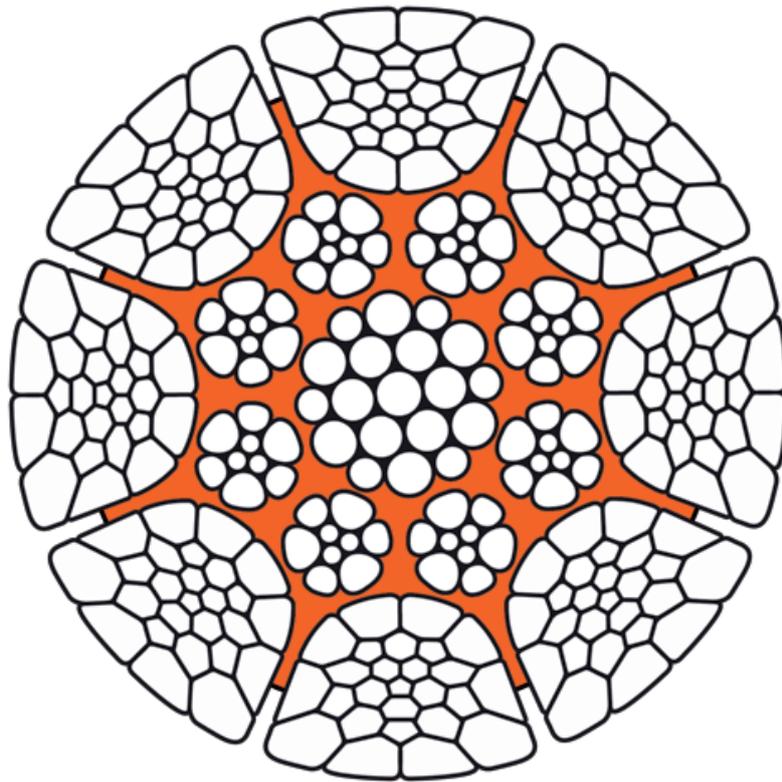
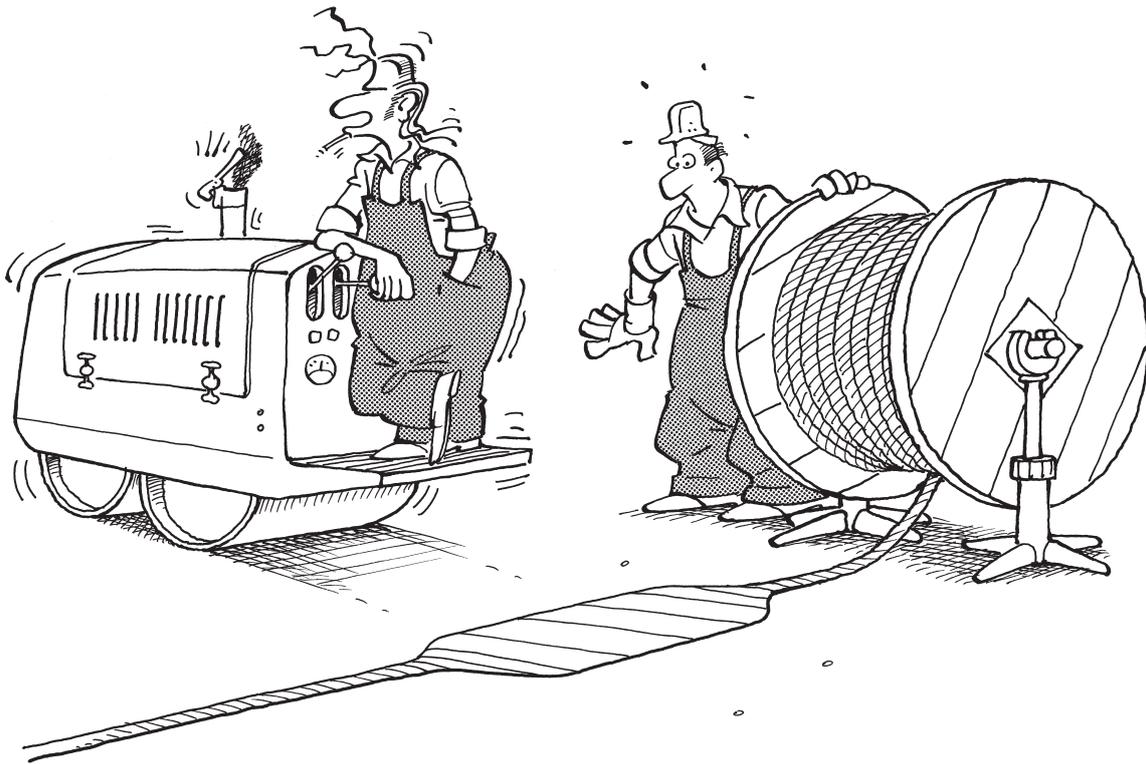


Fig. 42: Section d'un câble plastifié qui a été martelé

Les câbles martelés ont de bien plus grandes surfaces de contact avec les gorges des poulies ou des tambours que les câbles conventionnels dont la surface n'est pas lisse. La pression au contact est donc inférieure, ce qui conduit à une moindre usure, non seulement sur le câble mais également sur les tambours et sur les poulies.



Le 27 Avril 2000: Joe Bloggs inventa le câble martelé.

Les auteurs:

Dipl.-Ing. Roland Verreet
Ingenieurbüro für Fördertechnik
Wire Rope Technology Aachen
Grünenthaler Str. 40a • 52 072 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