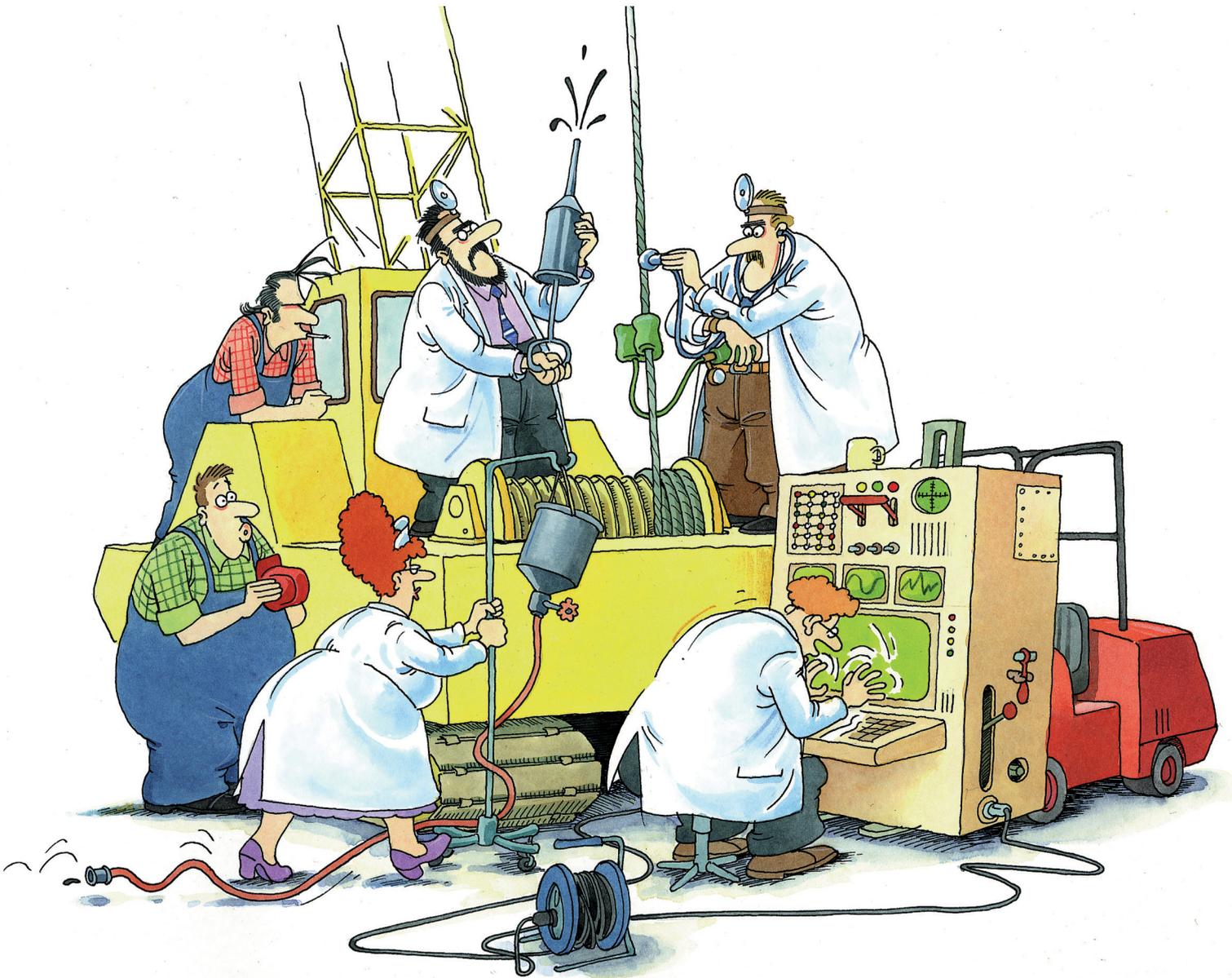


WIRE ROPE

TECHNOLOGY AACHEN



**Calcul de la durée de vie
d'un câble métallique**

Calcul de la durée de vie d'un câble métallique

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

Table des matières

1. Introduction	4
2. Calcul du nombre de cycles de flexion supportable	4
3. Définition d'un cycle de flexion	6
4. Définition d'un cycle de contre-flexion	6
5. Prédiction de la durée de vie	7
6. Le diamètre optimal nominal du câble.....	10
7. Le diamètre de câble le plus économique	11
8. Influence du spectre de charge	11
9. La pondération des contre-flexions	15
10. Comparaison de la durée de vie du câble pour 4 systèmes de levage [...]	18
11. Recherche de la zone la plus sollicitée du câble	21
12. La règle de Palmgren-Miner.....	24
13. Facteurs d'influence non pris en compte.....	25
14. Optimisation du système de levage	29
15. Remarques finales	30

© 1998, 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, même partielle, uniquement avec l'autorisation de l'auteur.

1. Introduction

Par opposition à d'autres éléments de machines qui peuvent être conçus avec une durée de vie illimitée, les câbles travaillant en flexion de façon dynamique (e. g. enroulement sur poulies) ont toujours une durée de vie limitée. Ils doivent par conséquent être contrôlés périodiquement afin d'être remplacés bien avant leur rupture.

Les concepteurs d'appareils de levage aimeraient malgré tout disposer d'une estimation de la durée de vie potentielle du câble dès les premières étapes de l'étude. Ils pourront, si nécessaire, améliorer l'architecture du système. C'est une des raisons pour lesquelles les auteurs réalisent, depuis de nombreuses années, des calculs afin de prédire la durée de vie des câbles. Cette brochure, qui présente dans le détail la méthode de calcul, montre le potentiel et les limites de ce mode de prévision.

2. Calcul du nombre de cycles de flexion supportable

August Julius Albert de Clausthal-Zellerfeld, qui est l'inventeur du câble métallique, réalisait déjà des essais de fatigue pour comparer les durées de vie de différentes compositions de câbles. Après lui, des chercheurs tels que Benoit, Wörnle ou Müller ont réalisé un très grand nombre d'essais de fatigue en flexion. Ils étudiaient l'effet des principaux facteurs d'influence sur la durée de vie des câbles. Le Prof. Feyrer, de l'université de Stuttgart, a assemblé toutes ces découvertes dans une formule qui permet de prédire la durée de vie d'un câble avec une bonne précision. La formule Feyrer originale s'établit de la façon suivante :

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

Dans cette formule

- N nombre de cycles de flexion
- d diamètre nominal du câble en mm
- D diamètre de la poulie en mm
- S tension dans le câble en N
- l longueur de la zone la plus sollicitée du câble en mm
- R_0 résistance à la rupture des fils en N/mm²

S_0 ($= 1\text{N/mm}^2$) et d_0 ($= 1\text{ mm}$) sont les unités pour la tension et pour le diamètre, qui rendent les fractions sans dimension. Les facteurs b_0 à b_5 sont des paramètres spécifiques pour chaque type de câble. Ils sont déterminés grâce à un grand nombre d'essais de fatigue en flexion, dont les résultats sont spécifiques à chaque type de câble.

D'autres versions de cette formule ont été développées, sans pour autant apporter plus de précision.

Les auteurs ont développé un type de machine d'essais spécifique qui est présentée dans une autre brochure (Une machine révolutionnaire d'essais de fatigue en flexion).

Depuis de nombreuses années, ils Casar conduisent ces essais de fatigue sur ce type de ses propres machines d'essais afin de déterminer les paramètres des différents types de chacun des câbles spéciaux Casar. Les résultats de chacun de ces essais contribuent à élargir la base de données, et ce faisant permettent d'augmenter la précision de chaque prédiction.

Ces essais ont mis en évidence une très bonne corrélation avec les prédictions réalisées sur la base de la formule Feyrer originale et les résultats obtenus sur site.

2.1. Le nombre moyen de cycles de flexion \tilde{N}

Il est possible, grâce à des techniques statistiques, de déterminer les facteurs b_0 à b_5 pour différents niveaux de fiabilité. Par exemple, le chiffre couramment utilisé est le nombre *moyen* de cycles de flexion \tilde{N} . Ce chiffre représente, pour des conditions données, le nombre *moyen* de cycles de fatigue qui serait réalisé pour un type de câble sur un grand nombre d'essais.

Le concepteur ou l'utilisateur d'un appareil de levage est en général intéressé par le nombre *moyen* de cycles de flexion. Il recherche en fait le nombre de cycles de flexion qu'il obtiendra en moyenne. Il doit cependant garder à l'esprit que la valeur moyenne signifie que pour un grand nombre d'essais la moitié des câbles va dépasser ce chiffre alors que l'autre moitié ne va pas l'atteindre.

Cela signifie que le chiffre défini comme étant la valeur moyenne du résultat d'un grand nombre d'essais ne peut en aucun cas être garanti par le fabricant du câble, pour un câble considéré isolément. Le simple terme valeur moyenne signifie que la moitié des câbles n'atteindra pas cette valeur.

Par convention \tilde{N} signifie le nombre moyen de cycles à la rupture et \tilde{N}_A signifie le nombre moyen de cycles à l'atteinte du critère de dépose.

2.2. Le nombre de cycles de flexion N10

Il y a des situations pour lesquelles il ne suffit pas de savoir que les câbles vont supporter en moyenne le nombre de cycles de flexion calculés.

Il est plutôt question de déterminer, avec un haut niveau de probabilité, le nombre de cycles de flexion que presque tous les câbles en service réaliseront. Cependant la dispersion des résultats obtenus lors d'essais de fatigue en flexion montre qu'il est pratiquement impossible de prédire un nombre de cycles qui sera obtenu dans tous les cas. C'est pourquoi on définit le nombre de cycles N10. Il correspond au nombre de cycles de flexion qui sera obtenu par 90% des câbles avec une probabilité de 95%. Donc seulement 10% des câbles essayés n'obtiendront pas le nombre de cycles N10. Il va de soi que le nombre de cycles en flexion N10 sera toujours inférieur au nombre *moyen* de cycles de flexion \bar{N} .

Par convention N10 signifie le nombre de cycles à la rupture et NA10 signifie le nombre de cycles à l'atteinte du critère de dépose que 90% des câbles obtiendront.

3. Définition d'un cycle de flexion

Un cycle de flexion se définit, pour le câble, soit par le passage d'un état droit à un état fléchi, puis au retour dans l'état droit (symbole ) , soit par le passage d'un état fléchi à un état droit, puis au retour à l'état fléchi dans la même direction (symbole ) . Chaque fois qu'une section de câble passe sur une poulie, elle réalise un cycle complet de flexion (c.a.d. le passage d'un état droit à un état fléchi, puis retour à un état droit). Chaque fois qu'une zone de câble s'enroule sur un tambour, elle réalise un demi-cycle de flexion (c.a.d. passage d'un état droit à un état fléchi).

4. Définition d'un cycle de contre-flexion

Un cycle de contre-flexion se définit, pour le câble, par le passage d'un état fléchi à un état droit, puis au retour à un état fléchi dans la direction opposée (symbole ) .

Pour ce qui concerne le cas de contre-flexion qui n'intervient pas dans un même plan, les points de vue des experts diffèrent très largement. Souvent, le passage d'un état fléchi à un état droit et ensuite à un état fléchi dans un plan décalé de 90° (Fig. 1a) est défini comme étant un cycle de flexion simple, alors que le passage d'un état fléchi à un état droit et ensuite à un état fléchi dans un plan décalé de 120° (Fig. 1b) est défini comme étant un cycle de contre-flexion.

Cependant l'expérience montre que l'angle entre les deux plans de flexion n'est pas le seul paramètre qui décide si les dommages causés au câble sont plus importants que ceux causés par un cycle de flexion simple. La distance entre les poulies doit également être prise en considération. Ainsi, dans le cas de petites distances entre les poulies, les dommages causés au câble sont déjà beaucoup plus importants avec un angle de 90° que dans le cas d'une flexion simple. C'est pourquoi un tel cycle devrait être considéré comme une contre-flexion.

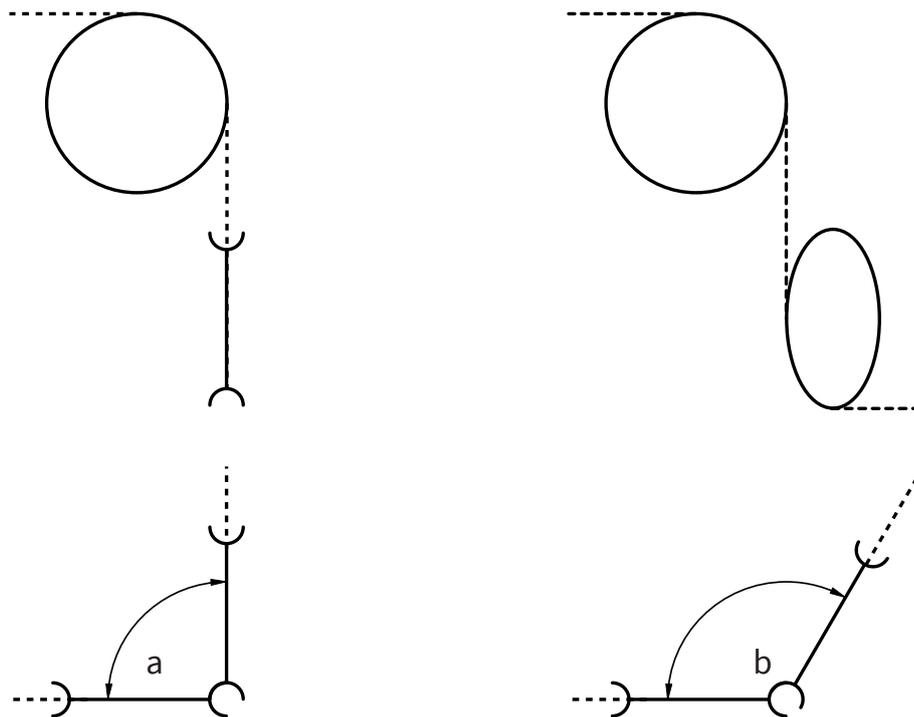


Fig. 1: Décalage du plan de flexion de 90° (a) et 120° (b)

D'autre part, avec des grandes distances entre les poulies il n'y a souvent pas d'effet négatif sur la durée de vie du câble, même sous des angles de 120° et plus. Ceci s'explique par le fait qu'entre les deux poulies le câble peut tourner autour de son axe d'un angle tel qu'il traverse les deux poulies dans la même direction de flexion.

Pour être du côté de la sécurité, les cycles de flexion avec changement de plan de flexion de 90° et plus devraient être comptés comme des cycles de contre-flexion.

5. Prédiction de la durée de vie

Les auteurs ont écrit un logiciel qui calcule, sur la base de la formule originale du Prof. Feyrer, pour un ensemble de données (type de câble, diamètre nominal du câble, diamètre des poulies, tension, résistance des fils et longueur de la zone la plus sollicitée) le nombre moyen de cycles de flexion réalisable avant d'atteindre le critère de dépose et le nombre moyen de cycles de flexion réalisable avant d'atteindre la rupture du câble. Cet outil permet également de calculer le nombre N_{10} de cycles de flexion avant dépose ou rupture, que 90% des câbles atteindront avec une probabilité de 95%.

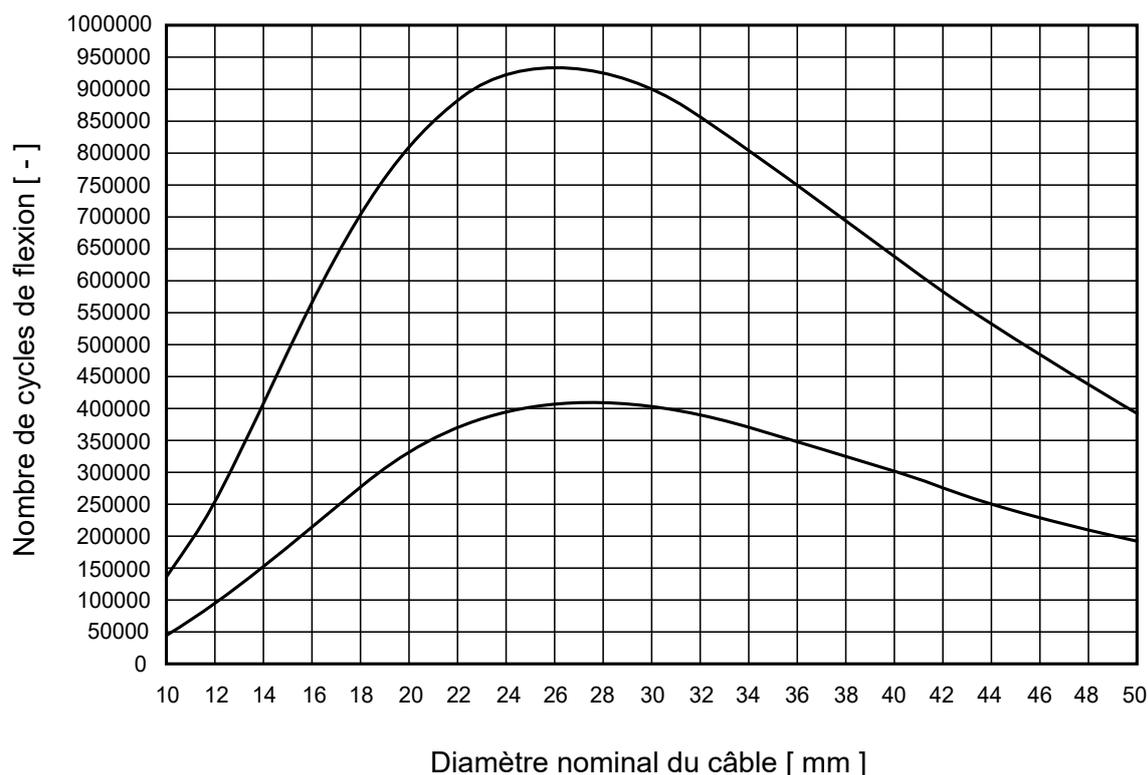


Fig. 2: Nombre de cycles de flexion en fonction du diamètre nominal du câble.

Exemple : Combien de fois un câble d'un type donné, avec un diamètre de 30 mm, une tension de 40.000 N, une résistance de fils de 1.770 N/mm² et une longueur de la zone la plus sollicitée de 20.000 mm, peut-il traverser une poulie de 600 mm?

Le logiciel calcule

400.000 cycles jusqu'au critère de dépose et
900.000 cycles jusqu'à la rupture.

Le logiciel présente également des illustrations graphiques des résultats en fonction des facteurs d'influence. Fig. 2 montre l'évolution du nombre moyen de cycles de flexion jusqu'à dépose du câble (courbe inférieure) et jusqu'à la rupture (courbe supérieure) en fonction du diamètre nominal du câble. Fig. 3 montre l'évolution du nombre moyen de cycles de flexion jusqu'à la dépose du câble (courbe inférieure) et jusqu'à la rupture (courbe supérieure) en fonction du diamètre de la poulie. Le nombre de cycles de flexion évolue de façon exponentielle en fonction du diamètre de la poulie.

Dans ce cas, le câble atteint un nombre moyen de 400.000 cycles de flexion pour un diamètre de poulie de 600 mm. Le passage du diamètre de la poulie à 750 mm, soit une augmentation de seulement 25%, conduira au doublement de la durée de vie.

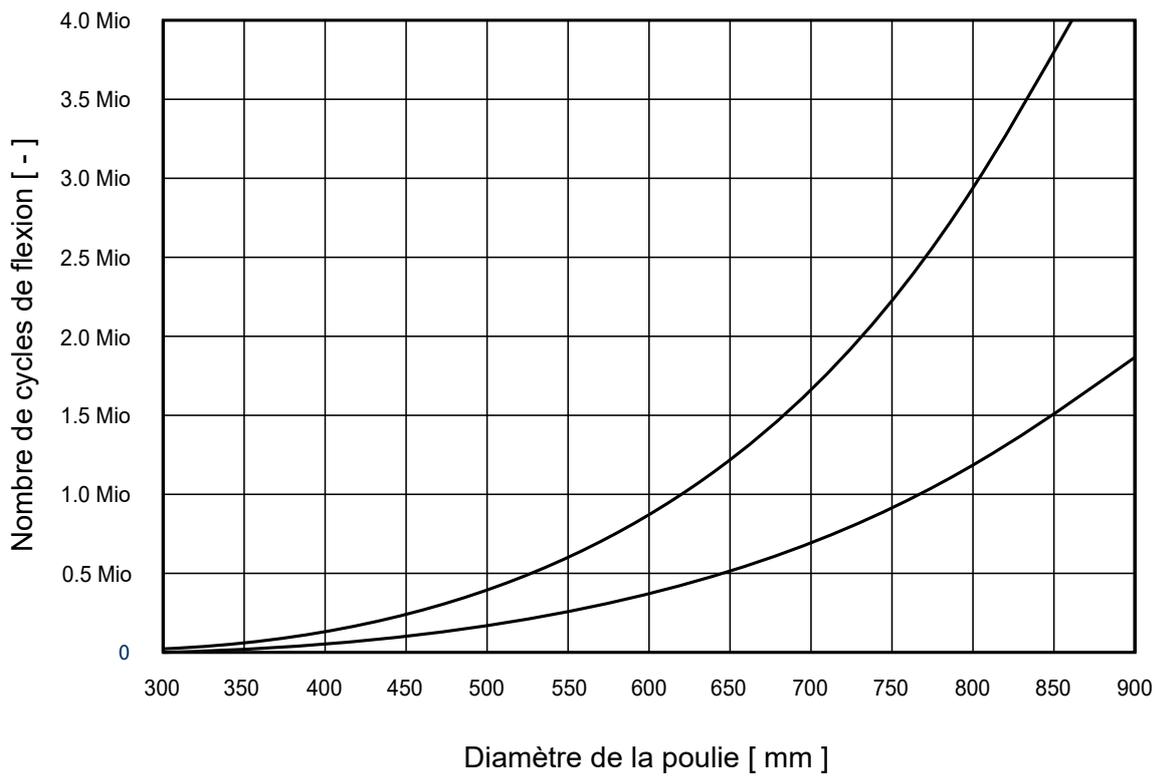


Fig. 3: Nombre de cycles de flexion en fonction du diamètre de la poulie.

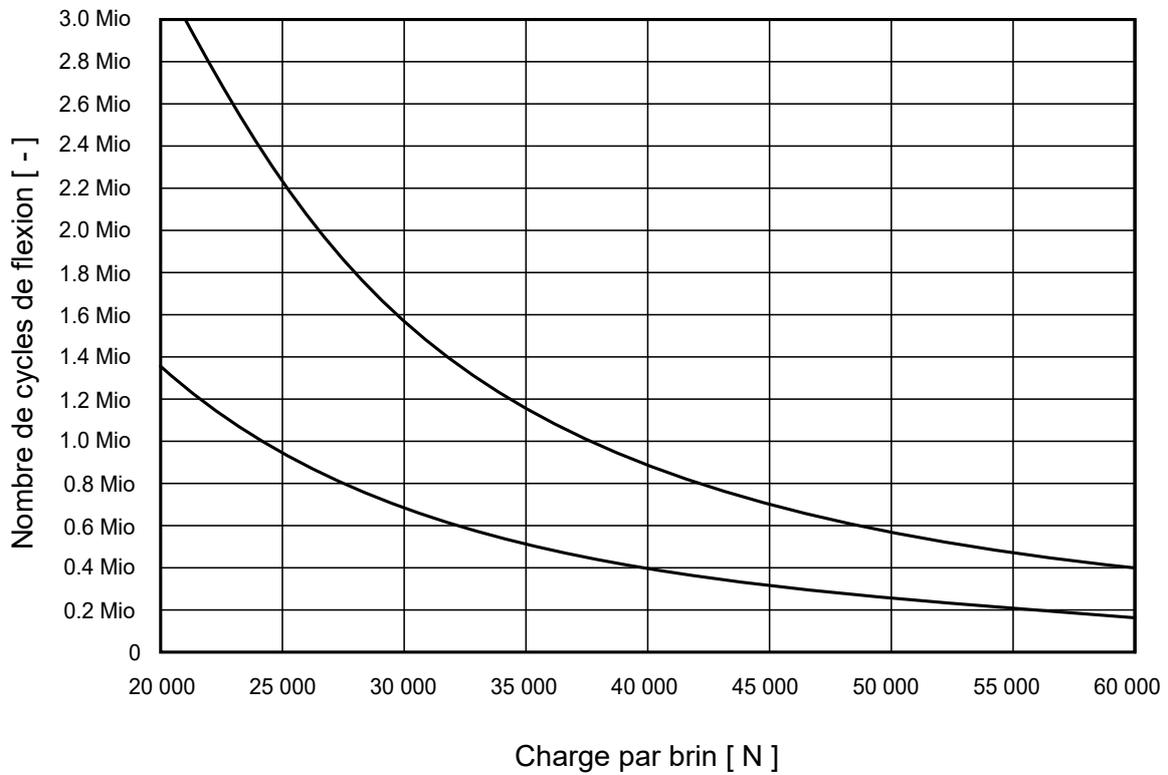


Fig. 4: Nombre de cycles de flexion en fonction de la tension.

Fig. 4 montre l'évolution du nombre moyen de cycles de flexion jusqu'à dépose du câble (courbe inférieure) et jusqu'à la rupture (courbe supérieure) en fonction de la tension du brin de câble. Les courbes mettent clairement en évidence que le nombre de cycles de flexion décroît de façon exponentielle en fonction de la tension.

6. Le diamètre optimal nominal du câble

Nous avons vu que le nombre de cycles de flexion supportable augmente continuellement avec l'augmentation du diamètre de la poulie (Fig. 3), et décroît continuellement avec l'augmentation de la tension (Fig. 4). Par contre, en fonction de l'augmentation du diamètre nominal du câble, dans un premier temps le nombre de cycles de flexion augmente puis, après avoir atteint un maximum, dans un second temps décroît alors que le diamètre nominal du câble continue à augmenter. Le diamètre nominal du câble pour lequel le nombre atteint son maximum est appelé « diamètre optimal nominal du câble ». Pour notre exemple un câble avec un diamètre nominal de 10 mm atteint son critère de dépose à seulement 50.000 cycles de flexion (Fig. 2). Avec une poulie de 600 mm de diamètre le câble travaille effectivement avec un rapport D/d très favorable, mais il est évident que la contrainte de traction induite par la tension extérieure de 40.000 N est largement trop importante pour un si petit câble.

Au début la durée de vie augmente avec l'augmentation du diamètre nominal du câble. Un câble d'un diamètre double (cad 20 mm) atteint son critère de dépose à environ 340.000 cycles de flexion, ce qui est presque sept fois la durée de vie du câble de 10 mm. Le rapport D/d a bien sûr été réduit à 30, mais la section métallique porteuse du câble a été multipliée par quatre, ce qui la rend capable de supporter la tension de 40.000 N avec beaucoup moins de difficultés que le câble de 10 mm.

Si le diamètre nominal du câble est une nouvelle fois doublé, il n'y aura cette fois plus de gain sur le nombre de cycles de flexion : un câble de 40 mm de diamètre nominal atteindra son critère de dépose pour 300.000 cycles de flexion ; son résultat est donc inférieur à celui d'un câble de diamètre nominal 20 mm. Il n'est pas défaillant à cause de la tension – le coefficient d'utilisation est maintenant 16 fois plus grand que celui d'un câble de 10 mm. Il est défaillant à cause du diamètre de 600 mm de la poulie qui est bien trop petit pour un câble de 40 mm de diamètre ($D/d = 15$).

En fait les câbles de petit diamètre (partie gauche du graphique) sont défaillants à cause d'une tension spécifique trop importante – les contraintes de flexion restent cependant faibles. Les câbles de grand diamètre (partie droite du graphique) sont défaillants à cause d'un trop petit rapport D/d – la tension spécifique est ici faible. Entre ces deux parties, les courbes montrent un maximum pour lequel la somme des influences négatives des contraintes de traction et des contraintes de flexion est minimale.

Comme mentionné ci-dessus, le diamètre pour lequel la courbe atteint son maximum est le «diamètre optimal nominal du câble». La Fig. 2 montre que le diamètre optimal nominal du câble est d'environ 27 mm. Pour ce diamètre nominal, le nombre moyen de cycles de flexion atteint est de 410.000.

7. Le diamètre de câble le plus économique

Le concepteur d'un appareil de levage ne devrait pas choisir un diamètre nominal de câble plus grand que le diamètre optimal nominal. Il dépenserait en fait plus d'argent pour obtenir une durée de vie plus courte. Il devrait plutôt choisir un diamètre nominal légèrement plus petit que le diamètre optimal. Comme le montre notre exemple (Fig. 2), un câble de diamètre nominal 24 mm aura une durée de vie pratiquement équivalente à celle d'un câble de diamètre optimal nominal 27 mm, alors que son diamètre est environ 10% inférieur. Par conséquent, le prix du câble sera plus faible, et ce câble pourra être installé sur un tambour moins large. Le poids du câble sera environ 20% moins lourd, il sera donc plus facile à installer, la machine sera globalement plus légère et disposera même d'une capacité de charge supérieure.

En conséquence, le diamètre de câble le plus économique est toujours légèrement inférieur au diamètre optimal (environ 90% du diamètre optimal).

8. Influence du spectre de charge

Le nombre de cycles de flexion que pourra réaliser le câble dans un système de levage dépend de plusieurs facteurs d'influence. Sous des conditions identiques, un câble sophistiqué atteindra facilement un nombre de cycles de flexion trois fois supérieur à celui atteint par un câble de conception simple. De la même manière un câble bien lubrifié, régulièrement et correctement relubrifié, atteindra normalement un plus grand nombre de cycles de flexion qu'un câble de même conception mais mal lubrifié. Le type d'utilisation de l'appareil de levage est un autre facteur d'influence très important.

Le classement d'un appareil de levage dans un groupe de mécanisme d'une norme décide déjà si le câble aura une grande ou une petite durée de vie. En effet, en fonction de la classification, la même charge sera levée avec un câble plus ou moins gros, et ce câble passera sur des poulies ayant un plus ou moins grand rapport D/d . Les câbles du groupe de mécanisme le plus élevé atteindront une durée de vie égale à environ 200 fois celle atteinte par les câbles du groupe le plus bas.

Il avait été suggéré de préciser dans les normes le nombre de cycles de flexion du câble que l'on pouvait escompter en fonction du groupe de mécanisme. Mais les câbles de systèmes de levage d'un même groupe de mécanisme n'atteindront pas nécessairement la même durée de vie, même si les systèmes de levage sont identiques.

Classe de temps de travail	Symbole		V006	V012	V025	V05	V1	V2	V3	V4	V5	
	Temps de travail moyen en h par jour, sur une année.		$\leq 0,125$	$> 0,125$ $\leq 0,25$	$> 0,25$ $\leq 0,5$	$> 0,5$ ≤ 1	> 1 ≤ 2	> 2 ≤ 4	> 4 ≤ 8	> 8 ≤ 16	> 16	
Spectre de charge	Nr	Désignation	Groupe de mécanisme									
	1	Léger	Petite fréquence de la charge maximale	1Em	1Em	1Dm	1Cm	1Bm	1Am	2m	3m	4m
	2	Moyen	Même fréquence des charges petites, moyennes et maximales	1Em	1Dm	1Cm	1Bm	1Am	2m	3m	4m	5m
	3	Lourd	Presque tout le temps avec charge maximale	1Dm	1Cm	1Bm	1Am	2m	3m	4m	5m	5m

Fig. 5: Classification des mécanismes selon DIN 15 020

Ceci s'explique par le fait qu'à l'intérieur d'un même groupe de mécanisme, les systèmes de levage peuvent travailler sous des spectres de charge très différents.

L'analyse ci-après est conduite sur la base de la norme DIN 15020. Les conclusions s'appliquent également pour des normes équivalentes, par exemple EN 16625.

La Fig. 5 présente la classification en fonction du groupe de mécanisme selon DIN 15020. Il est clair qu'un système de levage ayant une charge, par exemple, de 100.000 N pourra être classé dans le groupe 4m, aussi bien s'il travaille sous un spectre de charge « léger » plus de 16 heures par jour, sous un spectre de charge « moyen » entre 8 et 16 heures par jour, ou encore sous un spectre de charge « lourd » entre 4 et 8 heures par jour.

Malgré leurs différents modes d'utilisation, ces trois systèmes de levage sont dimensionnés en fonction de la plus grande tension qui est susceptible de se présenter. Cette tension, qui est la même pour les trois cas, conduira au choix de câbles identiques. Cependant, cette tension maximale, qui est bien évidemment le facteur d'influence le plus négatif pour la durée de vie du câble, intervient dans les trois cas sous des fréquences très différentes. Ainsi, bien que les trois cas soient classés dans le même groupe de mécanisme, les durées de vie des câbles seront très différentes. Ce phénomène est analysé ci-après.

La Fig. 6 présente, pour du transport normal et pour une configuration avec de 6 à 9 flexions par levage complet ($h_2 = 1,12$), les paramètres de dimensionnement du système de levage pour les 9 groupes de mécanisme selon DIN 15020.

Type de câble:	8 torons avec âme métallique plastifiée								
Coefficient de remplissage:	0,608	Charge par brin [N]: 100.000							
Coefficient de perte de câblage:	0,87	Type: Transport normale							
Résistance [N/mm ²]:	1.960	Coefficient h2: 1,12							
Groupe de mécanisme:	1Em	1Dm	1Cm	1Bm	1Am	2m	3m	4m	5m
Construction selon DIN									
Coefficient c:	0,063	0,067	0,071	0,075	0,085	0,095	0,106	0,118	0,132
Dia. minimal de câble d min:	19,92	21,19	22,45	23,72	26,88	30,04	33,52	37,31	41,74
Dia. de câble choisi:	20	22	23	24	27	31	34	38	42
Coefficient h1 poulie:	11,2	12,5	14,0	16,0	18,0	20,0	22,4	25,0	28,0
Dia. minimal de poulie D min:	250	297	353	426	542	673	841	1.045	1.310

Fig. 6: Dimensionnement du système de levage pour les groupes de mécanisme 1Em à 5m

La tension (100.000N) a délibérément été choisie élevée afin que, lors du choix du diamètre nominal du câble, les erreurs d'arrondi (écart entre diamètre minimum d_{min} et diamètre choisi d) soient très petites. Il apparaît que le diamètre nominal du câble varie de 20 mm à 42 mm, et que le diamètre des poulies varie de 250 mm à 1.310 mm.

Pour chacun de ces 9 groupes de mécanisme, le nombre moyen de cycles de flexion (\tilde{N}) que le câble (8 torons avec âme métallique plastifiée) pourra atteindre a été calculé pour les conditions suivantes :

- Tension toujours maximale
- Tension selon spectre de charge « lourd »
- Tension selon spectre de charge « moyen »
- Tension selon spectre de charge « léger »

Spectre de charge	Nr.	Désignation	Charge [%]	Fréquence [%]
	1	Léger	100,00	10,00
			44,00	40,00
			16,00	50,00
2	Moyen	100,00	16,67	
		77,30	16,67	
		54,70	16,67	
		32,00	50,00	
3	Lourd	100,00	50,00	
		63,00	50,00	

Fig. 7: Exemple numérique de définition d'un spectre de charge selon DIN 15 020.

Groupe de mécanisme	Seulement charge max.		Spectre de charge "lourd"		Spectre de charge "moyen"		Spectre de charge "léger"	
	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]
5 m	1.029.100	2.632.500	1.324.300	3.407.200	3.048.800	7.931.000	6.110.200	16.001.600
4 m	440.400	1.065.100	559.300	1.361.700	1.254.500	3.095.500	2.472.700	6.154.500
3 m	203.400	466.100	255.400	589.600	559.300	1.311.700	1.085.000	2.571.700
2 m	98.700	212.500	122.200	265.300	259.100	573.400	491.600	1.102.400
1 Am	49.900	101.700	61.200	126.000	127.200	267.300	237.700	507.100
1 Bm	25.500	48.400	30.800	59.200	61.800	121.700	112.700	225.800
1 Cm	16.300	28.900	19.400	34.800	37.200	68.700	65.400	123.700
1 Dm	11.000	18.400	12.900	21.900	23.700	41.500	40.300	72.600
1 Em	7.600	12.000	8.800	14.100	15.700	26.100	26.100	44.800

Fig. 8: Nombre moyen de cycles de flexion (\tilde{N}) que pourront atteindre les câbles, avant dépose et avant rupture, d'une part pour la charge maximale, et d'autre part pour les trois spectres de charge.

Groupe de mécanisme	Seulement charge max.		Spectre de charge "lourd"		Spectre de charge "moyen"		Spectre de charge "léger"	
	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]
5 m	100	100	129	129	296	301	594	608
4 m	100	100	127	128	285	291	561	578
3 m	100	100	126	126	275	281	533	552
2 m	100	100	124	125	263	270	498	519
1 Am	100	100	123	124	255	263	476	499
1 Bm	100	100	121	122	242	251	442	467
1 Cm	100	100	119	120	228	238	401	428
1 Dm	100	100	117	119	215	226	366	395
1 Em	100	100	116	118	207	217	343	373

Fig. 9: Nombre moyen de cycles de flexion (\tilde{N}) divisé par le nombre moyen de cycles de flexion sous charge maximale

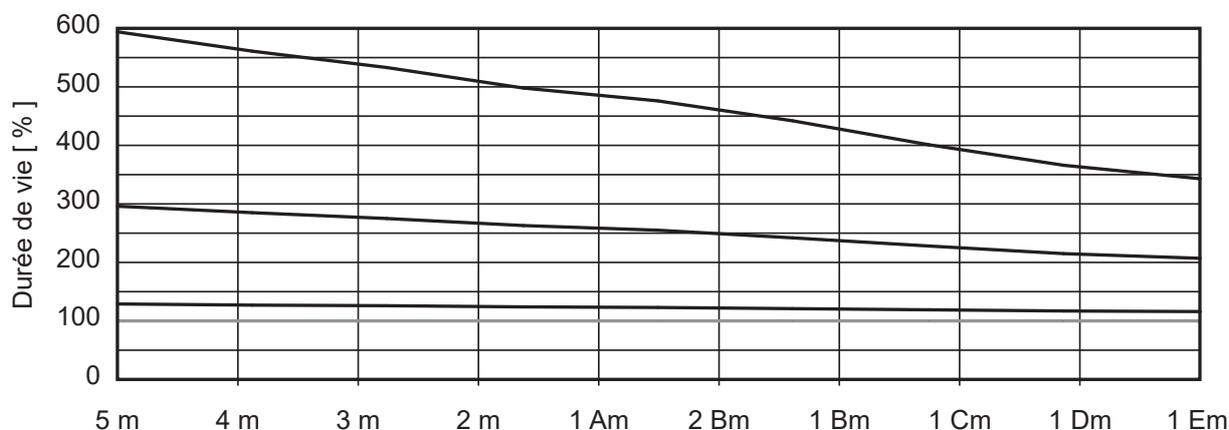


Fig. 10: Nombre moyen de cycles de flexion (\tilde{N}) d'un spectre de charge divisé par le nombre moyen de cycles de flexion sous charge maximale

Pour les trois spectres de charge, les tensions et leur fréquence d'apparition ont été choisies selon l'exemple numérique de la DIN 15 020 (Fig. 7)

Nous avons calculé le diamètre de câble et le diamètre de poulie correspondant à chaque groupe de mécanisme (Fig. 6). La Fig. 8 montre le nombre moyen de cycles de flexion (\bar{N}) que pourront atteindre ces câbles passant sur ces poulies, avant dépose et avant rupture, d'une part pour la charge maximale, et d'autre part pour les spectres de charge « lourd », « moyen » et « léger » selon Fig. 7.

La Fig. 9 présente le nombre moyen de cycles de flexion (\bar{N}) des trois spectres de charge divisé par le nombre moyen de cycles de flexion sous charge maximale, ce cas de charge étant pris pour référence. La Fig. 10 présente ces résultats sous forme graphique. Il apparaît clairement que les relations sont presque linéaires.

Quelle serait la valeur de référence à prendre en compte dans une norme pour un calcul de durée de vie ? Pour le groupe de mécanisme 4m sous un spectre de charge « lourd » notre câble atteindrait une durée de vie environ 28% supérieure à celle qu'il aurait sous la charge maximum. Pour un spectre de charge « moyen », la durée de vie serait le triple, et sous un spectre de charge « léger », la durée de vie pourrait même atteindre presque six fois celle qu'il aurait sous la charge maximum. Même pour le groupe le plus bas 1Em, le câble aurait encore une durée de vie double sous un spectre de charge « moyen », et une durée de vie presque quatre fois égale à ce qu'elle serait sous la charge maximum !

D'une manière générale, le nombre moyen de cycles de flexion augmente si l'on évolue vers les groupes supérieurs. Cependant, comme le montre la Fig. 8, un câble sous un spectre de charge « léger » dans le groupe de mécanisme 3m, atteint 1.085.000 cycles, soit nettement plus que les 559.300 cycles atteints par le même type de câble dans le groupe 4m sous un spectre de charge « lourd ». Il apparaît clairement que le nombre de cycles de flexion ne dépend pas uniquement du groupe de mécanisme, mais aussi, et même plutôt davantage du spectre de charge. C'est pourquoi indiquer un tel chiffre dans une norme sans préciser le spectre de charge n'a pas de sens.

9. La pondération des contre-flexions

Les premières comparaisons des résultats d'essais de fatigue en flexion sans contre-flexion avec les résultats d'essais réalisés avec contre-flexion ont conduit à une évaluation qui considère qu'une contre-flexion endommage le câble environ deux fois plus qu'une simple flexion ne le ferait. Ainsi la DIN 15020 précise qu'une contre-flexion doit être comptée comme deux flexions simples. Plus tard d'autres investigations, sous des conditions différentes, ont mis en évidence que l'endommagement augmentait avec l'amélioration des conditions de service, c.a.d. plus la durée de vie escomptée est élevée, plus la contre-flexion sera dommageab-

le. Ainsi, la réduction de durée de vie augmente avec l'augmentation du diamètre de la poulie et avec la réduction de la tension, non seulement en valeur absolue, mais également en pourcentage.

Selon Feyrer, le nombre de cycles de contre-flexion qu'un câble peut atteindre avant dépose et avant rupture peut s'exprimer en fonction du nombre de flexions simples et en fonction du rapport D/d, selon les formules suivantes :

$$\tilde{N}_{A\sim} = 3.635 \cdot \tilde{N}_{A\sim}^{0.671} \cdot (D/d)^{0.499}$$

$$\tilde{N}_{\sim} = 9.026 \cdot \tilde{N}_{\sim}^{0.618} \cdot (D/d)^{0.424}$$

Les auteurs ont étudié, pour chaque groupe de mécanisme de la DIN, la réduction du nombre de cycles de flexion causée par la contre-flexion. Ces investigations ont été conduites pour les systèmes de levage définis au chapitre 8. La Fig. 8 montre le nombre de flexions simples. La figure 11 montre le nombre de contre-flexions. La Fig. 12 montre les facteurs de pondération qui s'établissent comme ratio entre le nombre de flexions selon Fig. 8 et le nombre de contre-flexions selon Fig. 11. Les coefficients de pondération correspondant au spectre de charge « moyen » sont présentés sous forme d'histogramme en Fig. 13. Il apparaît que pour les groupes de mécanisme dans lesquels le câble est le plus sollicité (1Em et 1Dm), une contre-flexion endommage environ deux fois plus le câble qu'une flexion simple. Pour un groupe de mécanisme 2m, l'endommagement causé par une contre-flexion est maintenant presque 4 fois plus important, et il est environ 7 fois plus grand pour un groupe de mécanisme 5m.

Groupe de mécanisme	Seulement charge max.		Spectre de charge "lourd"		Spectre de charge "moyen"		Spectre de charge "léger"	
	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]
5 m	207.500	344.300	245.700	403.800	430.000	680.600	685.600	1.050.200
4 m	110.900	187.600	130.200	218.300	224.000	362.700	353.100	554.600
3 m	62.500	107.400	72.900	124.200	123.300	203.600	192.300	308.700
2 m	36.400	63.000	42.000	72.300	69.500	116.400	106.900	174.300
1 Am	21.800	38.200	25.000	43.600	40.900	69.400	62.300	103.200
1 Bm	13.100	23.000	14.900	26.000	23.800	40.600	35.600	59.500
1 Cm	9.100	15.800	10.200	17.700	15.800	27.000	23.100	38.800
1 Dm	6.600	11.400	7.300	12.700	11.000	18.800	15.800	26.600
1 Em	4.900	8.300	5.400	9.200	7.900	13.500	11.200	18.800

Fig. 11: Nombre moyen de cycles de contre-flexion que pourront atteindre les câbles avant dépose et avant rupture, d'une part pour la charge maximale et d'autre part pour les trois spectres de charge

Groupe de mécanisme	Seulement charge max.		Spectre de charge "lourd"		Spectre de charge "moyen"		Spectre de charge "léger"	
	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]	Dépose [-]	Rupture [-]
5 m	4,96	7,65	5,39	8,44	7,09	11,65	8,91	15,24
4 m	3,97	5,68	4,29	6,24	5,60	8,54	7,00	11,10
3 m	3,25	4,34	3,51	4,75	4,54	6,44	5,64	8,33
2 m	2,71	3,37	2,91	3,67	3,73	4,93	4,60	6,32
1 Am	2,28	2,66	2,44	2,89	3,11	3,85	3,82	4,92
1 Bm	1,94	2,11	2,07	2,28	2,60	3,00	3,17	3,79
1 Cm	1,79	1,83	1,90	1,97	2,35	2,55	2,83	3,19
1 Dm	1,67	1,62	1,76	1,73	2,15	2,21	2,55	2,73
1 Em	1,56	1,44	1,64	1,53	1,98	1,94	2,34	2,38

Fig. 12: Pondération des cycles de contre-flexion

Ces chiffres qui, dans une certaine limite, varient en fonction du spectre de charge, vont également être sensibles au type de câble. Cependant les résultats obtenus montrent déjà que la méthode traditionnelle de prise en compte de la contre-flexion (1 contre-flexion égale 2 flexions simples) ne prend pas suffisamment en compte l'influence négative de la contre-flexion, surtout pour les groupes supérieurs. Ces résultats mettent en évidence que les contre-flexions devraient particulièrement être évitées pour ces groupes supérieurs.

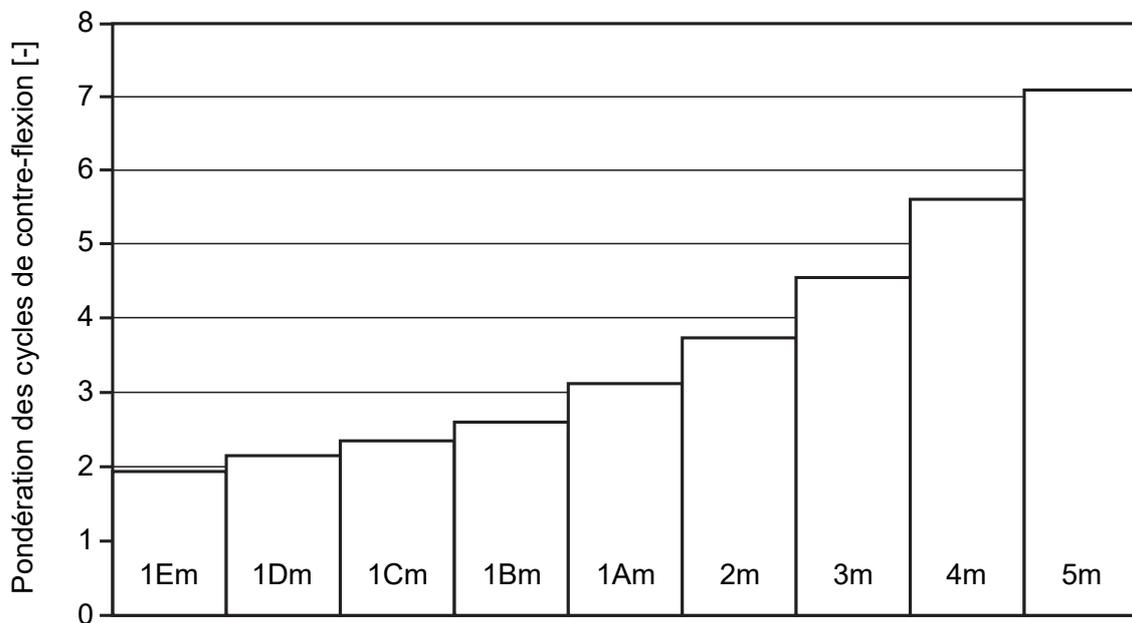


Fig. 13: Pondération des cycles de contre-flexion pour le spectre de charge « moyen »

10. Comparaison de la durée de vie du câble pour 4 systèmes de levage différents

Nous allons comparer la durée de vie des câbles de 4 systèmes de levage en brin simple. Le diamètre des tambours et poulies est le même pour les quatre systèmes. Les câbles sont de même type et ont le même diamètre nominal. Le mode d'utilisation des quatre systèmes est également le même.

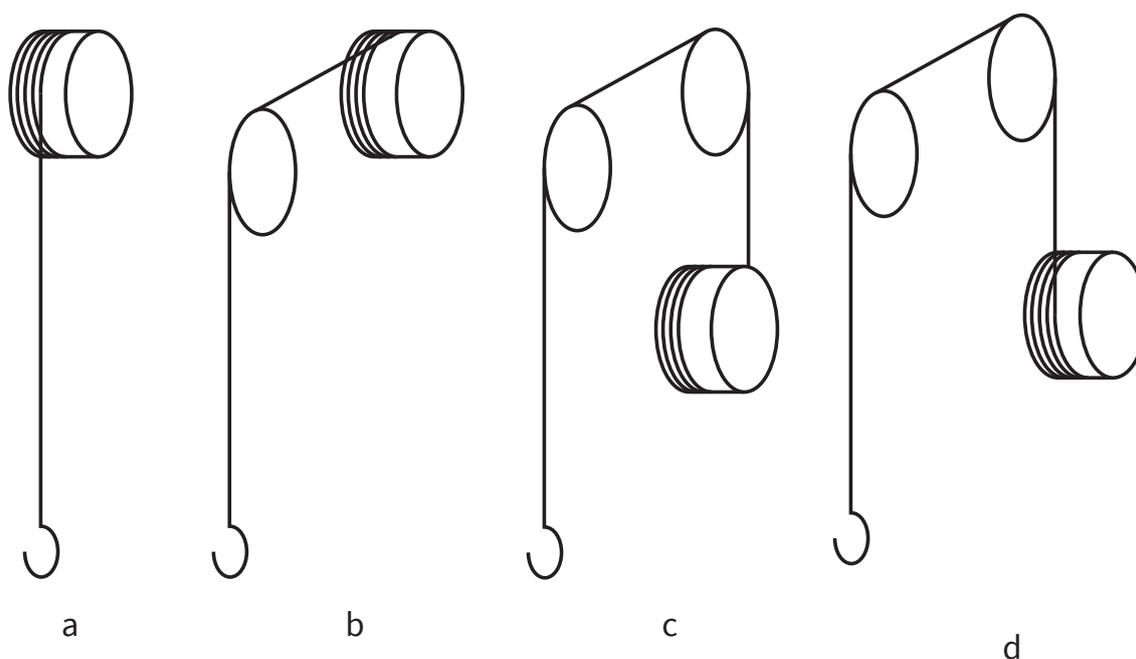


Fig. 14: 4 systèmes de levage

Le câble du système 1 (Fig. 14a) ne s'enroule que sur le tambour, il ne passe sur aucune poulie. Chaque zone du câble qui s'enroule sur le tambour subit une demi-flexion lors du mouvement de montée et une autre demi-flexion lors du mouvement de descente. Un cycle de levage complet génère donc une flexion simple (1FS) (Fig. 15).

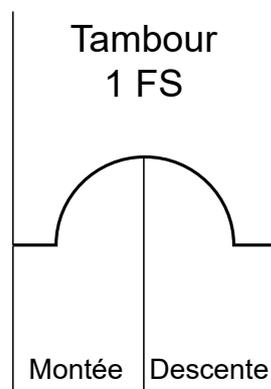


Fig. 15: Le câble du système 1 réalise un cycle de flexion par cycle de levage

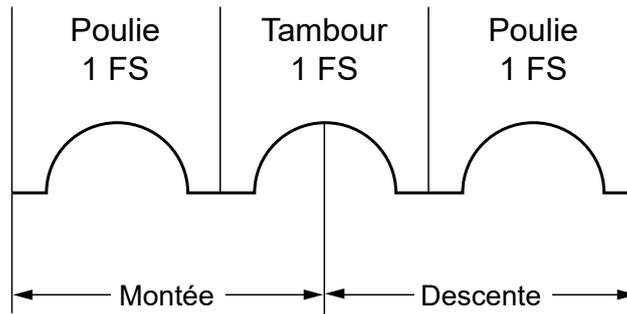


Fig. 16: Le câble du système 2 réalise 3 cycles de flexion par cycle de levage

Le câble du système 2 (Fig. 14b) passe d'abord sur une poulie puis s'enroule sur le tambour. La zone la plus sollicitée du câble subit une flexion sur la poulie et une demi-flexion sur le tambour lors du mouvement de montée, puis une autre demi-flexion sur le tambour ainsi qu'une autre flexion sur la poulie lors du mouvement de descente. Un cycle de levage complet génère donc trois flexions simples (3FS) (Fig. 16).

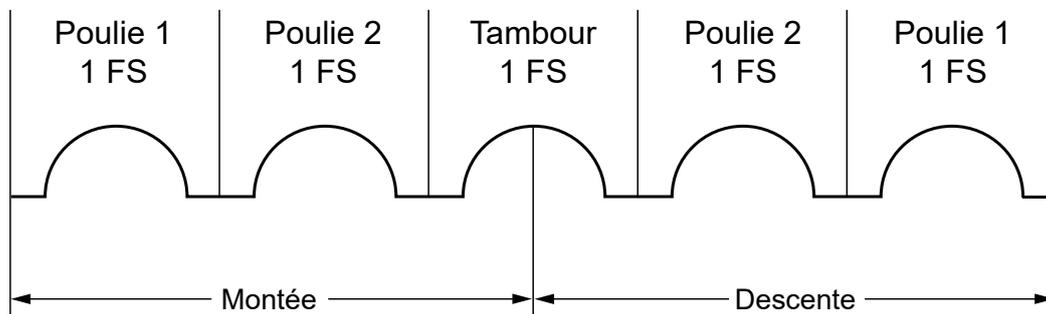


Fig. 17: Le câble du système 3 réalise 5 cycles de flexion par cycle de levage

Le câble du système 3 (Fig. 14c) passe sur deux poulies puis s'enroule sur le tambour. La zone la plus sollicitée du câble subit donc une flexion sur la première poulie, une flexion sur la seconde poulie et une demi-flexion sur le tambour lors du mouvement de montée, puis une autre demi-flexion sur le tambour ainsi que deux autres flexions sur les poulies lors du mouvement de descente. Un cycle de levage complet génère donc cinq flexions simples (5FS) (Fig. 17).

Le système 4 (Fig. 14d) diffère du système 3 du fait de la position du tambour. Le câble subit une contre-flexion (CF) lorsqu'il quitte la dernière poulie et s'enroule sur le tambour.

La zone la plus sollicitée du câble subit donc, lors du mouvement de montée, une demi-flexion lorsqu'elle entre sur la première poulie, une flexion lorsqu'elle quitte la première poulie et entre sur la seconde poulie et une contre-flexion lorsqu'elle quitte la seconde poulie et s'enroule sur le tambour. Elle effectue le même processus en sens inverse lors du mouvement de descente. Par conséquent, un cycle de levage complet génère, sur la zone la plus chargée du câble, trois flexions simples et deux contre-flexions (3FS+2CF) (Fig. 18). Nous avons vu ci-dessus qu'une contre-flexion endommage autant le câble que 2 à 9 flexions simples (cf Fig. 12). Ainsi, en fonction du coefficient de pondération de la contre-flexion, la zone la plus sollicitée du câble subira l'équivalent de 7 à 21 flexions simples.

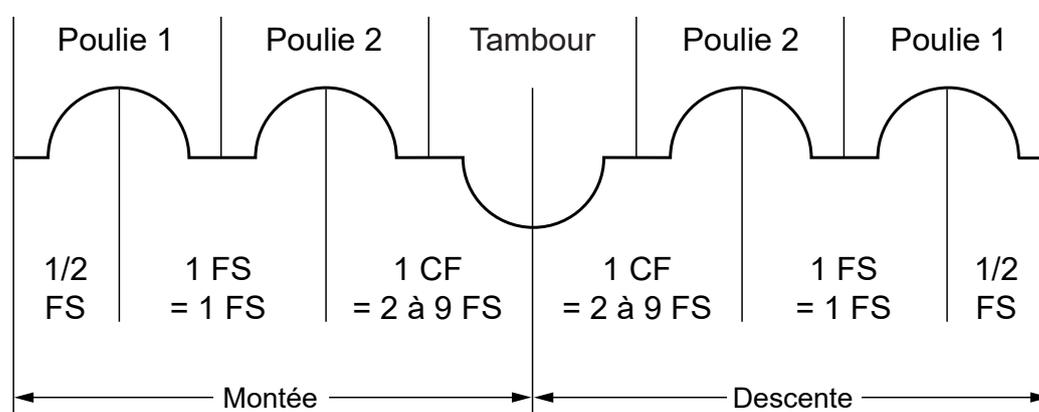


Fig. 18: Le câble du système 4 réalise de 7 à 21 cycles de flexion par cycle de levage

Ainsi, selon la conception du système, un cycle complet de levage (une montée et une descente) générera 1, 3, 5, ou de 7 à 21 cycles de flexion simples.

Supposons maintenant que la durée de vie du câble du système 1 soit de 24 mois (Fig. 19). Sous les mêmes conditions d'utilisation, le câble du système 2 subirait trois fois plus de cycles de flexion, ce qui réduirait sa durée de vie à 8 mois. Sous ces mêmes conditions d'utilisation, le câble du système 3 subirait cinq fois plus de cycles de flexion que dans le système 1, ce qui réduirait sa durée de vie à 5 mois à peine. Le câble du système 4 subirait 7 à 21 fois plus de cycles de flexion que dans le système 1, ce qui réduirait sa vie à une durée comprise entre 3,5 mois et 5 semaines.

Il est évident que la durée de vie d'un câble ne dépend pas seulement du rapport D/d , des tensions, de la qualité du câble ou du mode d'utilisation de la machine. Le nombre et l'agencement des poulies dans le système de levage sont au moins aussi importants.

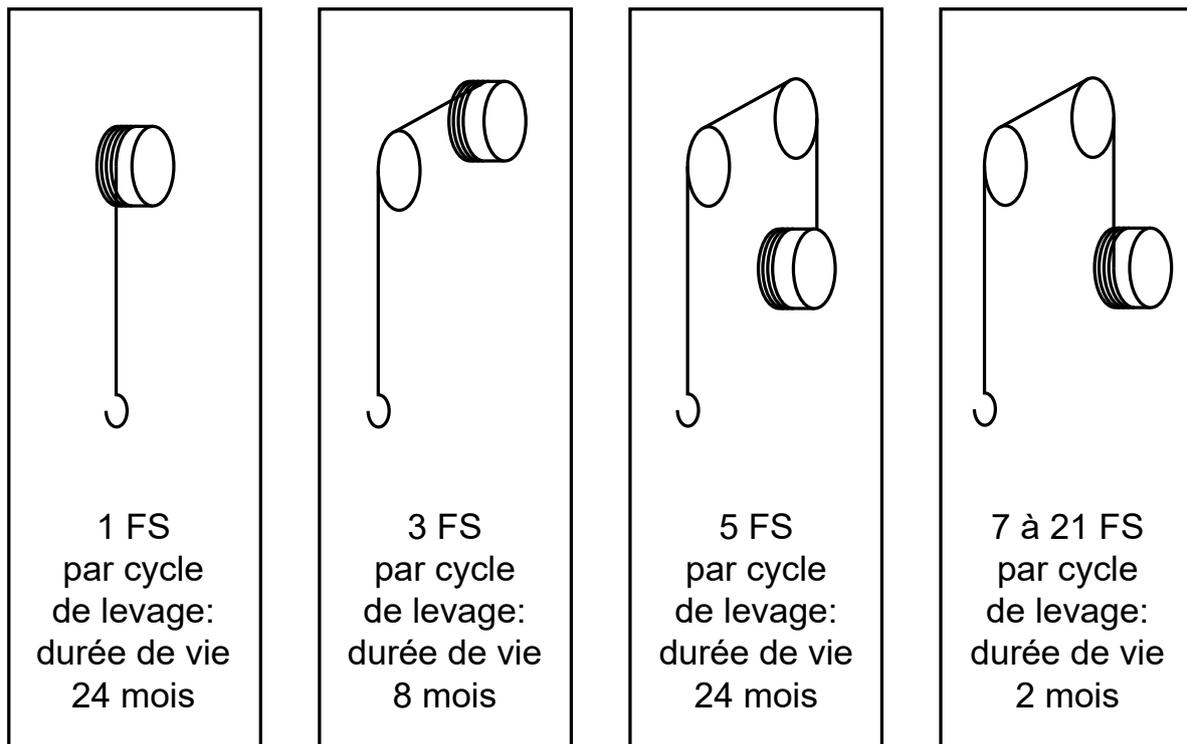


Fig. 19: Durée de vie moyenne pour chacun des 4 systèmes de levage

11. Recherche de la zone la plus sollicitée du câble

Toutes les parties du câble ne subissent pas le même nombre de cycles de flexion. Par exemple les trois tours morts sur le tambour ne subissent plus de cycle de flexion une fois installés. D'autres parties du câble vont s'enrouler sur le tambour et se dérouler durant les mouvements de montée et de descente, mais ensuite ne passeront plus sur aucune poulie. D'autres parties du câble vont d'abord passer sur plusieurs poulies et ensuite sur le tambour pendant l'opération de levage, puis par la suite subir le même nombre de cycles de flexion durant la descente de la charge.

En exploitation, il est très improbable que le câble casse pour cause de fatigue dans les zones les moins sollicitées en flexion, les critères de dépose seront d'abord atteints dans la zone qui réalise le plus grand nombre de cycles de flexion par cycle de levage. Le positionnement de la partie la plus sollicitée du câble ne dépend pas seulement de l'architecture du système de levage, mais aussi de la façon dont il est utilisé. La détermination de la zone la plus sollicitée du câble est parfois difficile et souvent impossible sans l'aide d'un ordinateur. A titre d'exemple, cette recherche est décrite ci-après pour un mouflage 4 brins (Fig. 20).

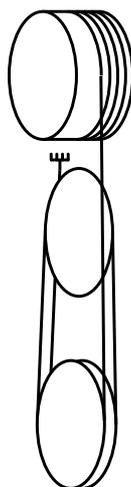


Fig. 20: Mouflage 4 brins

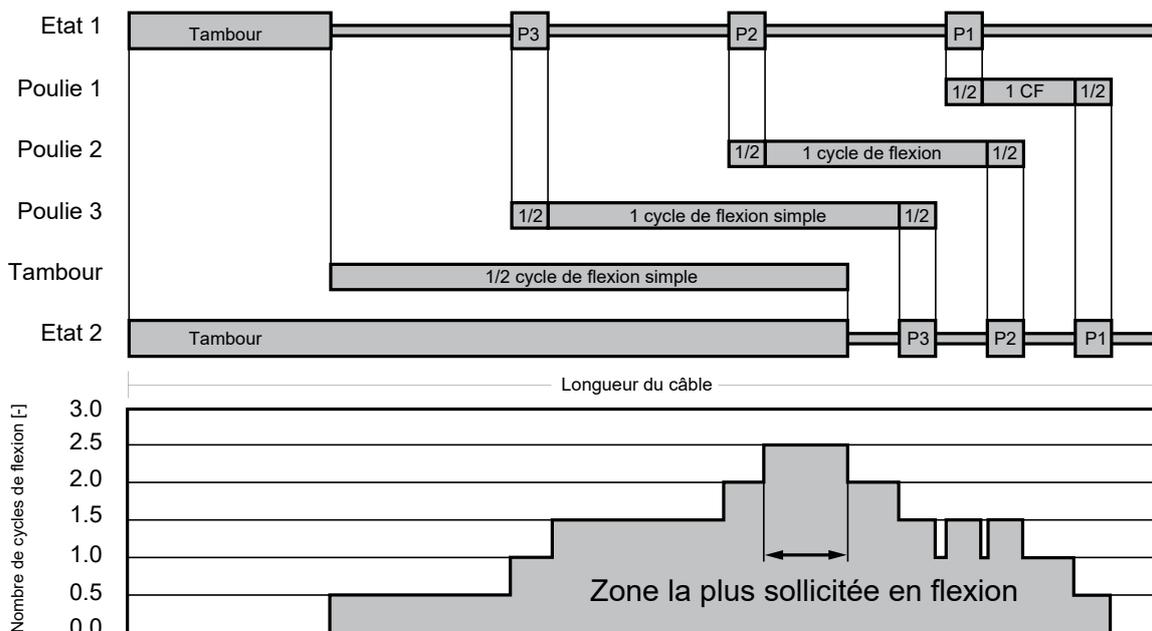


Fig. 21: Distribution des zones de câble sur les poulies et le tambour et détermination de la zone de câble la plus sollicitée

La partie supérieure de Fig. 21, pour « l'état 1 », illustre la distribution des longueurs de câble pour un crochet en position basse. Au début du cycle de levage, on identifie quatre zones dans lesquelles le câble est fléchi, une première zone sur le tambour puis ensuite trois autres zones sur les poulies P3, P2 et P1.

La partie inférieure de Fig. 21, pour « l'état 2 », illustre la distribution des longueurs de câble pour un crochet en position haute. Une grande partie du câble est maintenant positionnée sur le tambour, et de nouveau trois zones d'égale longueur sont situées sur les poulies P3, P2 et P1, mais cette fois beaucoup plus rapprochées.

Le calcul par ordinateur pour déterminer la zone la plus sollicitée du câble est conduit selon le processus décrit ci-après :

La partie du câble qui était sur le tambour à l'état 1 et qui est encore sur le tambour à l'état 2, ce qui est le cas au moins pour les trois tours morts, ne subit à l'évidence aucune flexion.

La partie du câble qui se trouve sur le tambour à l'état 2, mais qui n'y était pas à l'état 1 a donc été enroulée pendant le mouvement de levage et a par conséquent subi un demi-cycle de flexion.

Toute la partie du câble, qui en état 2 est positionnée à gauche de la poulie P3 mais qui était positionnée à droite de la poulie P3 en état 1 (Zone A Fig. 21), a donc traversé la poulie P3 pendant le mouvement de levage et a par conséquent subi un cycle de flexion. De la même façon, on détermine les zones de câbles qui ont subi un cycle de flexion sur les poulies P2 et P1.

La zone qui se trouve sur la poulie P3 en état 2 et qui n'y était pas en état 1 (Zone B en Fig. 21) est donc passée sur la poulie mais ne l'a pas quittée. Elle a par conséquent subi un demi-cycle de flexion durant le mouvement de levage.

La zone qui se trouvait sur la poulie P3 en état 1, et qui n'y est plus en état 2 (Zone C en Fig. 21) a donc quitté la poulie P3. Elle a par conséquent subi un demi-cycle de flexion durant le mouvement de levage. De la même façon, on détermine les zones de câble qui ont subi un demi-cycle de flexion sur les poulies P2 et P1.

Ensuite, tous les cycles de flexion répartis le long du câble sont cumulés comme indiqué sur la Fig. 21.

Lors du mouvement de descente les mêmes événements interviennent en sens inverse. Ainsi, pour un cycle complet de levage le nombre total de cycles de flexion sera le double de celui montré en Fig. 21.

S'il existait une zone de câble qui traverse toutes les poulies (soit trois dans notre exemple) et qui s'enroule sur le tambour, elle subirait alors 3,5 cycles de flexion (1 pour chaque poulie et 1/2 pour le tambour) ce qui constitue le maximum possible. Il n'y a cependant, comme indiqué en Fig. 21, aucune zone qui passe sur toutes les poulies. La zone la plus sollicitée est plutôt une zone qui passe sur les poulies P2 et P3 et qui ensuite s'enroule sur le tambour. Ainsi, le nombre maximum de cycles de flexion est de 2,5 pour un mouvement de levage et donc de 5 pour un cycle complet de levage. La zone la plus sollicitée du câble qui subit ce nombre de cycles de flexion est indiquée sur la Fig. 21. C'est la zone sur laquelle le câble atteindra en premier son critère de dépose, dans la mesure où il n'apparaît pas d'autres facteurs d'influence significatifs.

12. La règle de Palmgren-Miner

L'hypothèse de Palmgren et Miner de cumul des dommages fut d'abord développée pour le calcul de la durée de vie des roulements à billes. Plus tard des recherches ont mis en évidence que la règle de Palmgren – Miner pouvait aussi s'appliquer aux câbles métalliques. Cela signifie que les nombres relatifs de cycles de flexion jusqu'à dépose ou rupture du câble (c.a.d. le nombre de cycles réalisés divisé par le nombre de cycles supportables), sous différentes conditions, se cumulent toujours jusqu'à 1.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$$

Dans cette formule, n_i est le nombre de cycles sous la condition i , et N_i le nombre de cycles de flexion supportables sous cette condition.

Deux exemples simples illustrent l'application de la règle de Palmgren - Miner

12.1. Exemple 1:

Lors de chaque mouvement de levage, le câble réalise un cycle de flexion sur une poulie sous une tension de 10T. Durant chaque mouvement de descente consécutif, il réalise un autre cycle de flexion mais sous une tension de 4T.

Le nombre de cycles de flexion jusqu'à dépose se calcule à $N_1=30.000$ sous une tension de 10T, et à $N_2=210.000$ sous une tension de 4T. Combien de cycles complets de levage -n- (une montée sous 10T et une descente sous 4T) le câble pourrait-il supporter avant d'atteindre son critère de dépose ?

Dans ce cas la règle de Palmgren-Miner se formule de la façon suivante :

$$n_1/N_1+n_2/N_2=1$$

Sachant que $n_1=n_2=n$, on est en mesure d'établir l'équation suivante :

$$n/30.000 + n/210.000 = 1, \text{ et donc } n=26.250$$

Le câble est donc capable de réaliser 26.250 cycles complets de levage avant d'atteindre son critère de dépose.

12.2. Exemple 2:

Lors de chaque cycle de levage, le câble passe sur 4 poulies de 400 mm de diamètre ($n_1 = 4 \cdot n$) et sur 2 poulies de 280 mm de diamètre ($n_2 = 2 \cdot n$).

Le nombre de cycles de flexion jusqu'à dépose se calcule à

$N_1=300.000$ pour une poulie de 400 mm, et à

$N_2=100.000$ pour une poulie de 280 mm.

Combien de cycles complets de levage -n- le câble pourra-t-il supporter avant d'atteindre son critère de dépose ?

$$n_1 = 4n, n_2 = 2n \text{ et } 4n/300.000 + 2n/100.000 = 1, \text{ et donc } n = 30.000$$

Le câble est donc capable de réaliser 30.000 cycles complets de levage avant d'atteindre son critère de dépose.

13. Facteurs d'influence non pris en compte

13.1. Corrosion

Il va sans dire qu'une importante corrosion peut réduire considérablement la durée de vie d'un câble qui travaille sur des poulies. Du fait de la corrosion, on doit donc s'attendre à une dérive par rapport aux valeurs calculées.

13.2. Lubrification

Le lubrifiant est appliqué d'une part de façon à prévenir la corrosion du câble, et d'autre part en vue de réduire le frottement entre les fils. Il facilite ainsi les glissements relatifs des fils lorsque le câble est fléchi. Une lubrification insuffisante conduira très probablement à une réduction de la durée de vie du câble.

13.3. Usure

Comme expliqué ci-dessus, les paramètres spécifiques au câble b_0 et b_5 ont été déterminés lors d'essais de fatigue en flexion réalisés sur banc d'essai. Ainsi, l'usure générée d'une part du fait des mouvements relatifs des éléments constituant le câble, et d'autre part entre le câble et la poulie, a influencé la valeur de ces paramètres. Une usure excessive, qui pourra par exemple apparaître dans le cas d'une utilisation dans une atmosphère abrasive, peut conduire à une durée de vie inférieure à la valeur calculée.

13.4. Le matériau des gorges de poulie

Les essais de fatigue en flexion conduits pour déterminer les paramètres spécifiques d'un câble sont réalisés avec des poulies en acier. Ces valeurs pourront changer si d'autres matériaux sont utilisés pour la fabrication des poulies.

13.5. La forme des gorges de poulie

Selon ISO 16625 le diamètre idéal d'une gorge de poulie est compris entre le diamètre nominal du câble +56% et le diamètre nominal du câble +108%. Le diamètre idéal étant le diamètre nominal +7,5%. Les essais de fatigue en flexion réalisés pour déterminer les paramètres spécifiques du câble sont conduits avec des poulies dont le diamètre de la gorge est le diamètre nominal du câble +6%.

Si les gorges sont trop étroites ou trop larges, la durée de vie du câble sera forcément réduite.

Sur la base d'essais en laboratoire, des chercheurs ont publié des facteurs de réduction de la durée de vie du câble en fonction de la dimension de la gorge. Les auteurs sont convaincus que la réduction de la durée de vie des câbles, causée par une mauvaise géométrie de la gorge de poulie, est en pratique plus grande que celle déterminée par des essais en laboratoire. Lors d'un essai en laboratoire le câble peut s'adapter au profil de la gorge en se déformant sur la faible longueur d'essai. Par contre, dans une application réelle, chaque fois que le câble traverse une poulie de géométrie incorrecte une section différente de sa circonférence sera en contact avec la gorge. Ainsi il ne sera pas possible de créer une déformation permanente comme lors des essais en laboratoire. La durée de vie du câble sera donc réduite.

13.6. Angle de déflexion

Quand un câble aborde une poulie avec un angle de déflexion, il touche d'abord le flanc de la gorge et ensuite roule au fond de cette gorge. La torsion introduite dans le câble lors de ce processus a un effet négatif sur la durée de vie du câble. Des chercheurs ont proposé des facteurs de réduction de la durée de vie en fonction de l'amplitude de l'angle de déflexion. Mais de même que précédemment les auteurs pensent que ces facteurs, qui ne sont le fruit que d'essais en laboratoire, ne permettent pas d'établir des prédictions pour des applications réelles.

L'ampleur des dommages causés au câble du fait de l'introduction d'une torsion ne dépend pas seulement de la valeur de cette torsion, mais également de la longueur de câble qui est susceptible d'absorber cette torsion. Par exemple, une même torsion de 360° sera négligeable si elle se distribue le long d'un câble de 100 m de long, alors qu'elle réduira considérablement la durée de vie du câble si elle est introduite sur un câble de seulement 10 m de longueur.

13.7. Fatigue en traction

Un câble ne fatigue pas seulement à cause de la fatigue en flexion générée lors du passage sur les poulies et tambours, mais également du fait des changements répétés de tension. Ainsi, même un câble statique, qui ne passe sur aucune poulie comme par exemple le câble de suspension de la flèche d'une grue, aura une durée de vie limitée. Cette dernière sera cependant plusieurs fois supérieure à celle des câbles de la même installation mais qui passent sur des poulies. Le calcul de la durée de vie des câbles sollicités par des variations de tension fera l'objet d'une autre brochure.

Dans la plupart des cas, avant et/ou après les passages sur les poulies, la tension dans le câble change du fait de la prise ou de la dépose de la charge. En admettant que le nombre de cycles de fatigue par cycle de levage est important et sachant que les dommages causés au câble par la variation de tension sont au moins d'un ordre de grandeur inférieur à ceux causés par la fatigue en flexion, l'influence des phénomènes de fatigue en tension sur la durée de vie d'un câble passant sur des poulies peut être négligée.

Admettons, par exemple, un système de levage dans lequel, pour chaque cycle de levage, le câble va sur 5 poulies et revient sur 5 poulies (c.a.d. qu'il réalise 10 cycles de flexion par cycle de levage), et pour lequel le nombre de cycles de flexion, avant atteinte du critère de dépose, est $N_A=100.000$. S'il l'on ne prend pas en compte l'influence des changements de tension, le câble atteindra son critère de dépose après 10.000 cycles de levage.

Lors de chacun de ces cycles de levage le câble est en plus endommagé par les changements de tension. Cette dernière passe de la valeur de base à la tension maximale puis retourne à la valeur de base. Admettons que le câble peut supporter un ces changements de tension $N_{AZ}=1.000.000$ de fois avant d'atteindre son critère de dépose. Selon Palmgren – Miner les endommagements se cumulent de la façon suivante :

$$\begin{aligned} 1/N &= 10/100.000 + 1/1.000.000, \text{ ce qui conduit à} \\ N &= 9.900 \end{aligned}$$

Il apparaît clairement que la prise en compte de la fatigue en tension n'affecte la durée de vie du câble que de 1%.

13.8. Mouvements récurrents pendant des opérations automatiques

L'augmentation de tension allonge le câble, la réduction de tension le raccourcit. Sur la plus grande partie du câble, ce changement de longueur se réalise sans résistance de l'extérieur. L'endommagement généré par un tel changement de tension est facilement modélisable lors d'un essai de fatigue en tension. Cependant, les zones qui sont situées sur une poulie, ou sur la première spire d'un tambour lors du changement de tension, réagissent de manière différente. Ces zones ne peuvent s'allonger ou se raccourcir que s'il y a mouvement par rapport à leur appui, la gorge par exemple. Ces mouvements de glissement génèrent systématiquement des contraintes additionnelles dans le câble et une usure aussi bien de la surface du câble que de la surface de la poulie ou du tambour.

Si la position de chargement ou de déchargement change tout le temps, les contraintes additionnelles ainsi que l'usure associée vont se distribuer sur une grande longueur du câble. Par exemple, si la même zone de câble n'est positionnée sur une poulie au moment du chargement qu'une fois sur vingt, ces contraintes additionnelles et l'usure auront en fait un effet négligeable.

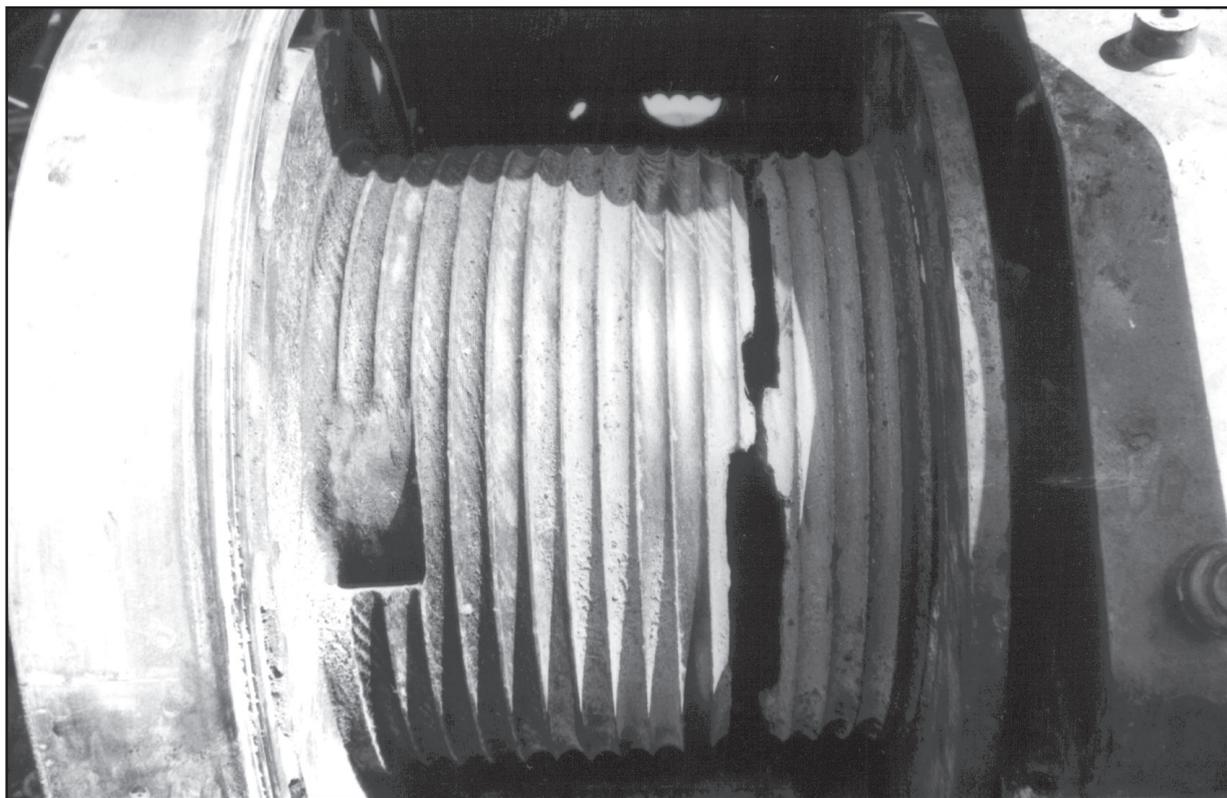


Fig. 22: Le tambour coupé en deux par le câble au droit de la zone de prise de la charge.

Par contre, si cette zone de câble est positionnée sur une poulie ou sur la première spire d'un tambour lors de chaque changement de tension, comme c'est le cas sur les machines automatiques, l'effet de ce changement de tension n'est pas négligeable. Dans ce cas ce sont toujours les mêmes zones de câble qui sont soumises aux contraintes additionnelles et à l'usure associée. C'est une des raisons pour lesquelles les câbles des installations fonctionnant en mode automatique avec des mouvements récurrents ont des durées de vie nettement plus courtes que celles des installations à mouvements aléatoires.

Fig. 22 montre un tambour coupé en deux par le câble au droit de la zone de prise de la charge. Il ne fait pas de doute que le câble a également beaucoup souffert.

Des recherches sur ce sujet sont conduites. Cependant les résultats obtenus n'ont pas encore été suffisamment validés pour justifier leur prise en compte dans un calcul.

14. Optimisation du système de levage

La méthode de calcul présentée ici ne permet pas seulement de prédire la durée de vie d'un câble sous des conditions données. Elle permet également soit d'optimiser le système de levage afin d'obtenir une durée de vie maximale pour le câble, soit de minimiser les coûts et/ou les dimensions du système pour une durée de vie donnée. Supposons que l'on ait à concevoir un système de levage constitué d'un tambour et d'une poulie (Fig. 14b). D'une part la durée de vie du câble jusqu'au critère de dépose devra être de 200.000 cycles, et d'autre part les parties coûteuses du système (tambour, réducteur, moteur, frein GV) devront être le plus petit possible. Comme le montre la Fig. 16, un cycle de levage génère deux cycles de flexion sur la poulie et un seul cycle de flexion sur le tambour. La méthode de calcul nous permet d'évaluer l'augmentation de diamètre des poulies qui permettra de compenser l'effet de la réduction du diamètre du tambour sur la durée de vie du câble (Fig. 23).

Diamètre de tambour [mm]	N_A tambour [-]	N_A poulie [-]	Diamètre de poulie [mm]	Cycles de levage [-]
500	600.000	600.000	500	200.000
475	501.600	665.300	515	200.000
450	415.000	720.100	530	200.000
425	339.600	973.100	575	200.000
400	274.600	1.472.400	645	200.000

Fig. 23: Différentes combinaisons de diamètre de tambour et de diamètre de poulie qui permettent d'atteindre l'objectif de 200.000 cycles de levage.

Nous calculons dans un premier temps le nombre de cycles de flexion que le câble sera capable d'atteindre sur un tambour de diamètre donné et dans des conditions données. Ensuite nous appliquons la formule de Palmgren – Miner pour calculer le nombre de cycles qu'il faudra obtenir sur la poulie afin de tenir l'objectif de 200.000 cycles de levage. Finalement nous appliquons la méthode de calcul pour déterminer le diamètre de poulie qui est nécessaire pour obtenir sur la poulie le nombre de cycles de flexion calculés avec la formule de Palmgren – Miner.

15. Remarques finales

Les auteurs seront toujours prêts pour réaliser aussi bien des calculs de prédiction, que de l'aide au dimensionnement de système de levage, que de l'expertise de systèmes existants. Comme cela a déjà été explicité plusieurs fois, du fait de la nature statistique de ces prédictions et à cause de l'existence de nombreux facteurs d'influence additionnels, les valeurs calculées ne peuvent en aucun cas être garanties.

Un calcul de prédiction de durée de vie nécessite la fourniture des éléments suivants :

1. Une documentation technique très détaillée du système (schéma et/ou dessins de conception) ainsi que des informations relatives au mode d'utilisation.
2. Le type de câble (par exemple 8 torons sur âme métallique plastifiée, croisé, 1770 N/mm²)
3. Le diamètre nominal du câble (par exemple 20 mm)
4. Le diamètre primitif de chaque poulie (par exemple 500 mm)
5. Le diamètre primitif des tambours (par exemple 400 mm)
6. La tension (par exemple 20.000 N) ou le spectre de charge (par exemple 10.000N pour 60% des cycles de levage, 25.000 N pour 40% des cycles de levage). Pour des systèmes mouflés, il faut préciser si la charge s'applique au brin de câble ou au moufle.

Les informations transmises seront bien sûr traitées avec le plus haut niveau de confidentialité. Tous commentaires, remarques et suggestions qui permettront d'améliorer cette brochure sont les bienvenus.

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