

WIRE ROPE

TECHNOLOGY AACHEN



**Comment optimiser la répartition
des efforts dans un cabestan**

Comment optimiser la répartition des forces dans un cabestan

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

Table des matières

1. Introduction	4
2. Premier problème : La fatigue en flexion.....	6
3. Second problème : La génération de chaleur.....	6
4. Troisième problème : Les pics de tension à l'intérieur du système.....	7
5. Quatrième problème : Chocs et mouvements répétitifs.....	9

© 2013, 2018, 2021 Ingenieurbüro für Drahtseiltechnik Wire Rope Technology Aachen GmbH

Titre et dessins humoristiques: Rolf Bunse

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

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

1. Introduction

Un cabestan peut être vu comme une « boîte noire », qui agit comme un amplificateur ou comme un réducteur de force dans un câble ou dans tout autre corps élastique (que nous dénommerons dorénavant câble).

Le câble peut, par exemple lors du levage d'une charge du côté de la « grande force », entrer dans la « boîte noire » de ce côté sous une tension T_1 et la quitter du côté de la « petite force » sous une tension T_2 (Fig. 1).

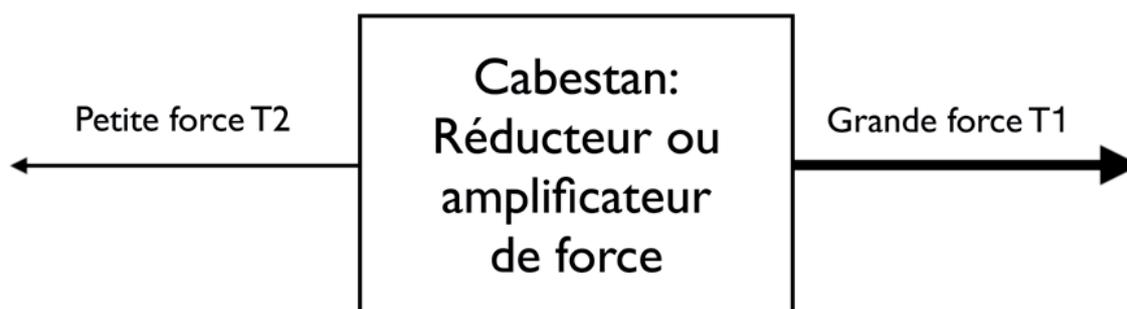


Fig. 1

Il peut également, par exemple lors de la descente d'une charge du côté de la « grande force », entrer dans la « boîte noire » du côté de la « petite force » sous une tension T_2 et la quitter du côté de la « grande force » sous une tension T_1 (Fig. 1).

L'amplification ou la réduction de la force s'opèrera selon la formule d'Euler / Eytelwein avec :

$$T_1 \leq T_2 \cdot e^{\mu\alpha} \quad (\text{Formule 1})$$

T_1 tension dans le câble du côté de la « grande force »

T_2 tension dans le câble du côté de la « petite force »

μ coefficient de frottement entre le câble et la poulie motrice

α angle d'enroulement autour de la poulie

L'amplification ou la réduction maximum de la force sera atteinte lorsque

$$T_1 = T_2 \cdot e^{\mu\alpha} \quad (\text{Formule 2})$$

le câble commencera à glisser. Ci-après nous appellerons le rapport T_1/T_2 , facteur d'amplification ou de réduction, en fonction du sens de déplacement du câble.

Pour la suite nous utiliserons à titre d'exemple un coefficient de frottement de 0,125.

Comme le glissement du câble est un événement qu'il faut éviter, les cabestans « boîtes noires » sont en général surdimensionnés en matière d'adhérence. Si par exemple le facteur d'amplification ou de réduction nécessaire est de 23 (ce qui signifie 4 tours complets autour de la poulie pour un coefficient de frottement de 0,125, voir Fig. 2), le cabestan à double tambour devrait prévoir que le câble s'enroule sur le tambour sur 5 tours complets (Fig. 3), ce qui conduira à une amplification ou une réduction de 50 qui est plus du double de la valeur recherchée.

Ceci conduira à la réalisation de deux cycles de flexion supplémentaires pour la portion de câble qui passe dans le cabestan, mais ceci ne semble pas cher payé compte tenu de l'augmentation de la sécurité vis-à-vis du glissement du câble.

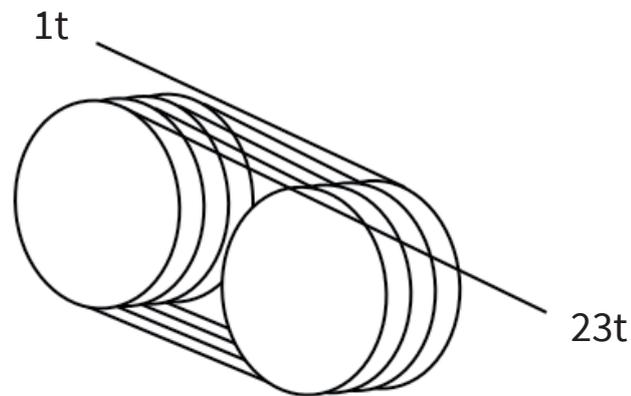


Fig. 2

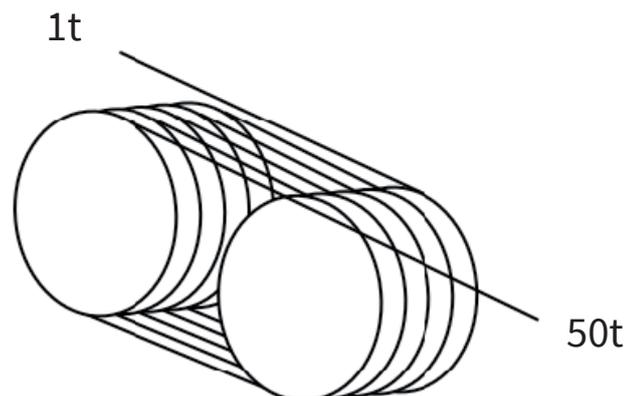


Fig. 3

Pour les charges plus petites que la charge maximum, le système sera encore plus surdimensionné. La « boîte noire » (par exemple un cabestan à double tambour) pourrait se contenter d'un facteur d'amplification ou de réduction de 10 (ce qui nécessite 3 tours complets autour des tambours du cabestan), mais le câble s'enroulera 5 fois autour des tambours, générant ainsi 4 cycles de flexion inutiles.

Ceci est cependant généralement considéré comme pas cher payé pour obtenir un coefficient de sécurité vis-à-vis du glissement de cinq fois ce qui est nécessaire.

Le surdimensionnement d'un cabestan génère cependant bon nombre de problèmes, qui souvent ne sont pas compris par la plupart des concepteurs de ce type de système. Il peut même contre toute attente, réduire significativement le niveau de sécurité du système.

2. Premier problème : La fatigue en flexion

Dans un cabestan plusieurs poulies sont agencées relativement proches les unes des autres. Elles peuvent être connectées (comme dans un cabestan à double tambour) ou être motorisées indépendamment, ou être agencées selon une combinaison des deux.

Si le mouvement du câble est souvent inversé (comme sur un système de compensation de houle, pour lequel le câble se déplace en avant et en arrière dans le cabestan pour compenser les mouvements du bateau générés par la houle), le câble traversera un plus grand nombre de poulies sous grande tension que nécessaire, et générera par conséquent plus de cycles de fatigue en flexion que nécessaire. Ceci pourra conduire à une défaillance prématurée du câble.

3. Second problème : La génération de chaleur

Lors des déplacements répétés en avant et en arrière au travers du cabestan afin de compenser les mouvements du bateau, les parties du câble passant sur des poulies seront fléchies à chaque entrée sur une poulie, et redeviendront droites à chaque sortie de poulie.

Du fait des frottements entre les éléments constitutifs du câble et entre le câble et les poulies, les sections concernées du câble s'échaufferont. Ceci pourra conduire à une perte de la lubrification et par conséquent à une dégradation accélérée du câble. La chaleur pourra également initier un processus de « strain ageing » des fils du câble. Ces deux effets deviennent d'autant plus significatifs que le diamètre du câble augmente.

4. Troisième problème : Les pics de tension à l'intérieur du système

Fig. 4 montre la tension dans le câble pour un cabestan à double tambour dans lequel le câble passe 7 fois sur les tambours (soit 14 enroulements de 180°). La tension du côté « petite force » est réglée à 1t.

La tension du côté « grande force » pourra atteindre 244t avant que le câble ne commence à glisser (facteur d'amplification de 244).

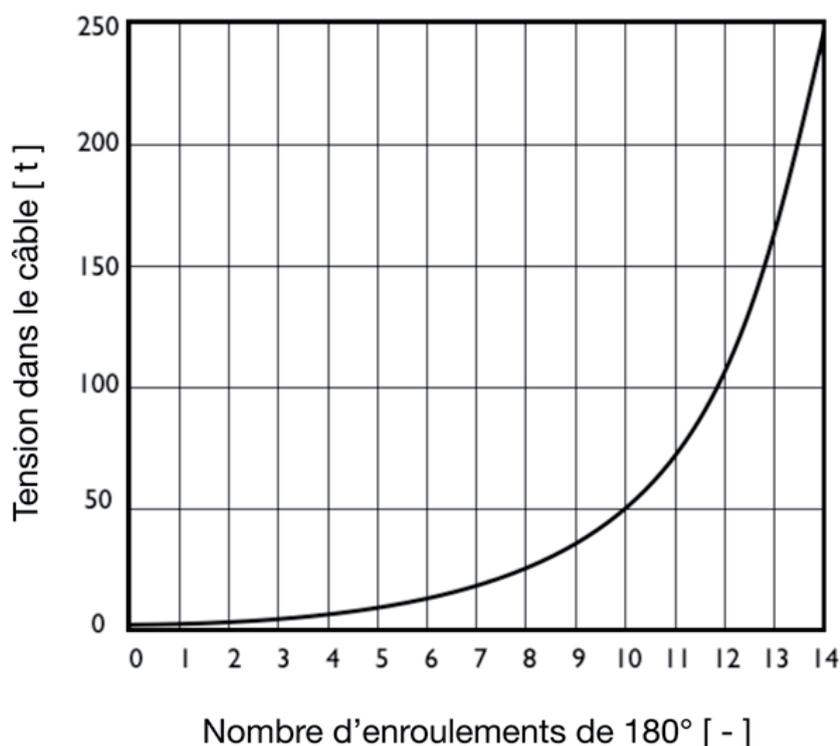


Fig. 4

Ce système est conçu pour lever des charges avec une tension de 50t du côté « grande force » (facteur d'amplification de 50), qui nécessiterait seulement 5 passages sur les tambours (ou 10 enroulements de 180°). L'augmentation de la sécurité vis à vis du glissement par l'ajout de 2 passages sur les tambours est considérée comme un bonus.

Fig. 5 montre l'évolution théorique de la tension dans le câble en fonction du nombre d'enroulements de 180°. Le câble entre du côté droit et traverse les poulies 14, 13, 12 et 11 avec la « grande force » T1 (qui est de 50t). Ensuite, conformément à la loi d'Euler – Eytelwein, la tension dans le câble diminue selon la fonction exponentielle présentée ci-dessus (Formule 1) jusqu'à atteindre la « petite force » T2 (qui est de 1t).

Ainsi, selon la théorie établie qui est la base de la conception des cabestans, on trouvera toujours la force maximale à l'entrée du cabestan (pour un levage de charge), ou à la sortie du cabestan (pour une descente de la charge), c'est-à-dire sur la dernière poulie du côté « grande force ».

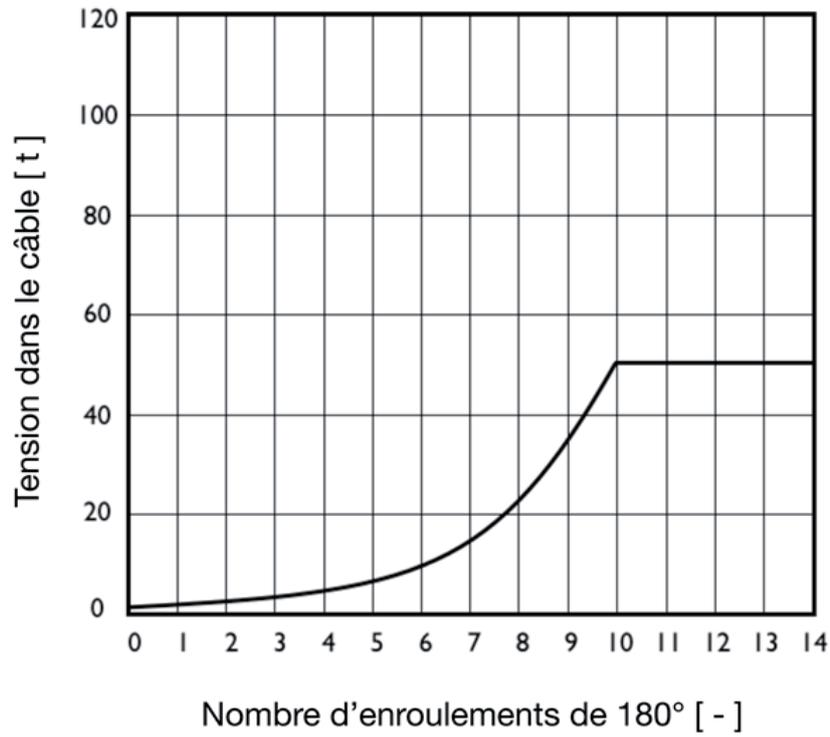


Fig. 5

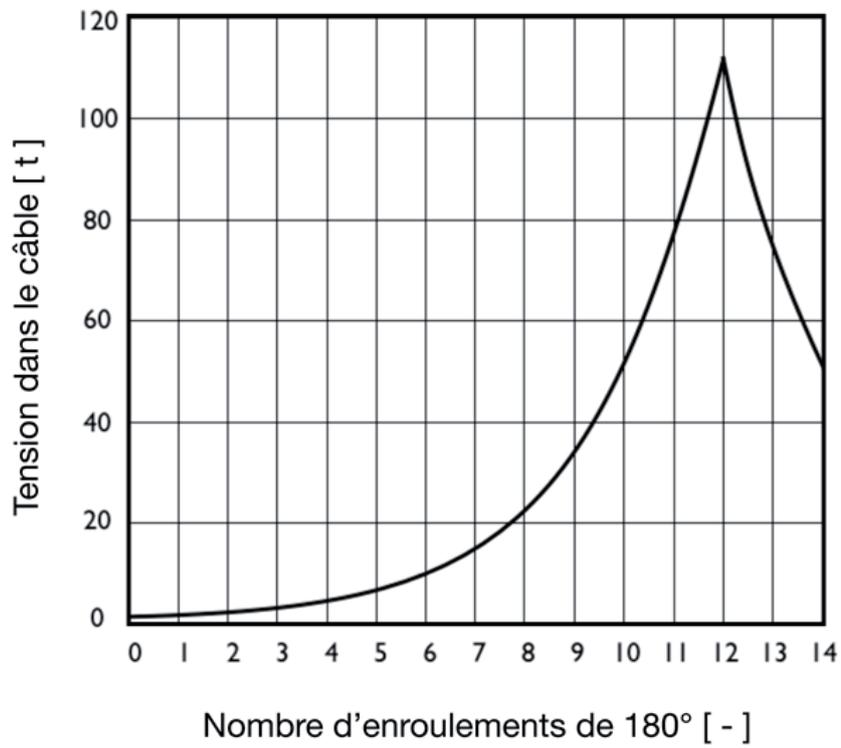


Fig. 6

En réalité on peut obtenir une distribution des tensions dans le câble telle que présentée sur la Fig. 6. Il est possible qu'une fonction exponentielle se développe de chaque côté du cabestan, et génère un pic de tension à l'intérieur du système. Dans le cas de notre exemple, le pic de tension sur la 12ème poulie génère une tension dans le câble qui est plus du double de la tension du côté « grande force ».

Non seulement le câble subira 4 cycles de flexion qui ne sont pas nécessaires pour prévenir le glissement du câble, mais de plus ces cycles seront réalisés sous des tensions supérieures à celles considérées comme la tension maximum dans le système.

La réalisation de cycles de flexion inutiles, de plus sous des tensions plus importantes que nécessaire, conduira à une plus grande fatigue en flexion et donc à une réduction considérable de la durée de vie du câble.

Dans certains cas la tension peut même dépasser la charge de rupture du câble, provoquant ainsi la rupture du câble à l'intérieur du cabestan.

Quelques ruptures d'axes de tambour peuvent aussi avoir eu pour origine des tensions dans le câble qui étaient nettement supérieures à celles anticipées par le concepteur.

5. Quatrième problème : Chocs et mouvements répétitifs

Fig.7 montre de nouveau la tension dans le câble en fonction du nombre d'enroulements sur les deux tambours d'un cabestan.

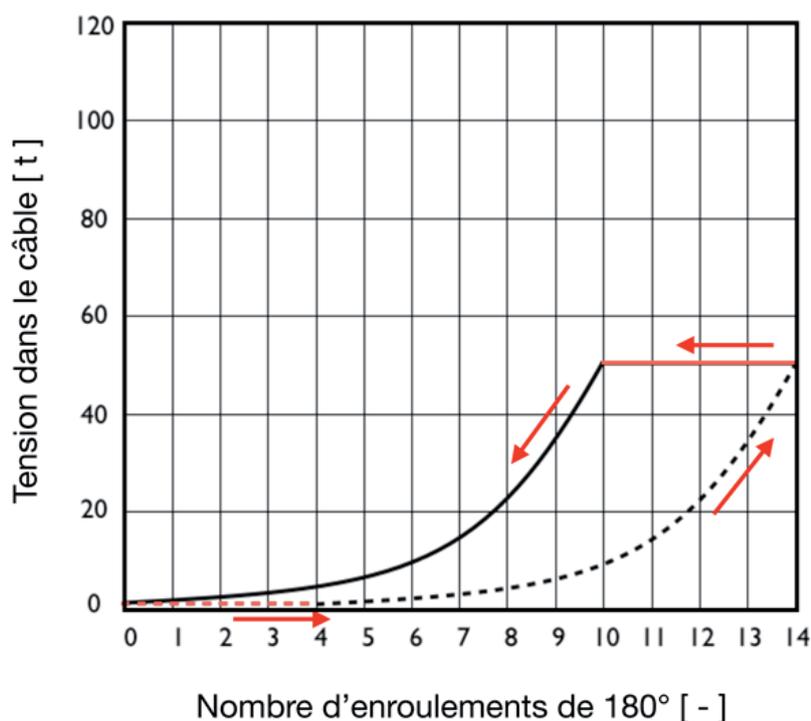


Fig. 7

Le câble s'enroule 7 fois sur chacun des tambours, ce qui correspond à 14 enroulements de 180° . La tension dans le câble du côté « grande force » est de 50t, la tension du côté « petite force » est de 1t. Le cabestan fait partie d'un système de compensation de houle. Quand le bateau est soulevé par une vague, le cabestan descend la charge en déroulant du câble, et lorsque le bateau descend, le cabestan soulève la charge en enroulant du câble, compensant ainsi les effets de la houle.

Quand il soulève la charge, le câble entre dans le système sur la poulie 14 (à droite sur le graphique) et traverse avec la même tension les poulies 14, 13, 12 et 11 (partie rouge de la courbe en trait plein) avant que la tension ne diminue selon une fonction exponentielle sur les poulies 10 à 1 (partie noire de la courbe en trait plein).

Quand il descend la charge, le câble entre dans le système sur la poulie 1 (à gauche sur le graphique) et traverse les poulies 1, 2, 3 et 4 sous une tension de 1t (partie rouge de la courbe en trait pointillé), avant que la tension n'augmente selon une loi exponentielle sur les poulies 5 à 14, pour atteindre 50t à la sortie du cabestan (partie noire de la courbe en trait pointillé).

Lors d'un levage, la tension dans le câble va suivre la ligne pleine. La tension sur la poulie 10 sera de 50t (point A de la Fig. 8).

Lors d'une descente, la tension dans le câble va suivre la ligne pointillée. La tension sur la poulie 10 sera seulement de 10,4t (point B de la Fig. 8). La tension au point A est 4,8 fois supérieure à celle au point B.

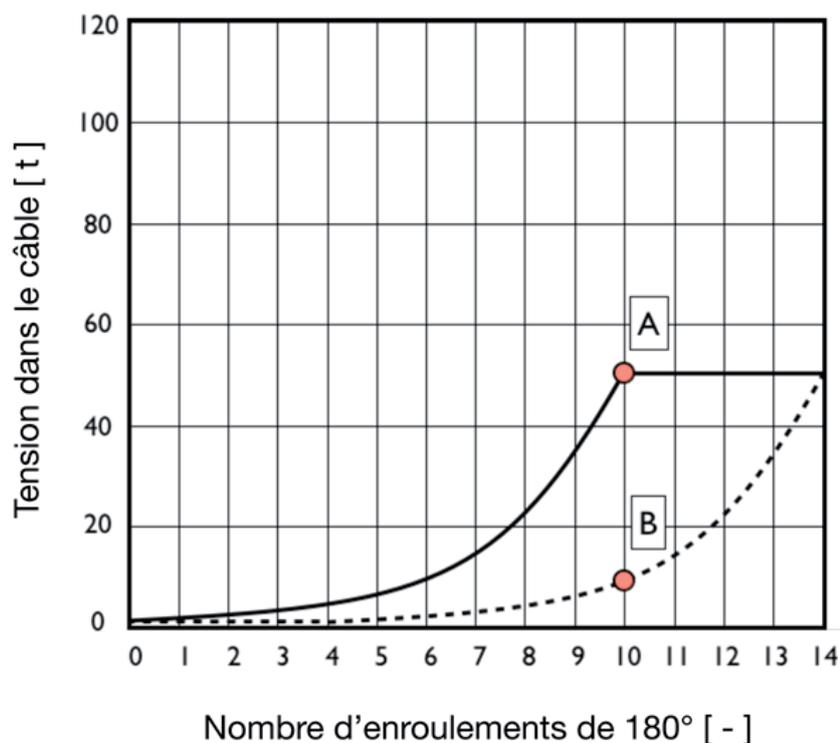


Fig. 8

Quand le câble lève et descend la charge de façon répétée, par exemple pour un système de compensation de houle, la tension dans le câble doit alternativement être au niveau du point A ou du point B. Cela signifie que chaque fois que le mouvement est inversé, la tension dans le câble doit être augmentée ou diminuée par un facteur 5.

Ceci va générer une fatigue en tension significative, qui s'ajoutera à l'inutile fatigue en flexion causée par les poulies superflues comme expliqué précédemment. De plus le câble changera continuellement de longueur pour s'adapter aux nouvelles tensions. Dans les zones où le câble est en contact avec les poulies, il y aura ainsi génération d'abrasion tant sur le câble que sur la poulie.

Une solution possible pour éviter les problèmes mentionnés ci-dessus, consiste à déconnecter du cabestan les poulies non nécessaires, et à les reconnecter dès qu'il y en a besoin. Il est alors préférable de déconnecter les poulies du côté « petite force ».

Une autre possibilité serait de gérer les poulies indépendamment. Cette solution nécessite cependant une unité de contrôle intelligente disposant d'informations relatives à la tension sur chaque poulie du cabestan. Un tel système est très onéreux.

Une autre solution, plus innovante, qui sera discutée plus en détail ci-après, est de gérer la distribution des efforts dans le cabestan en agissant sur la tension du côté « petite force ».

Fig. 9 montre la distribution des efforts dans le cabestan discutée ci-avant avec une tension de 50t du côté « grande force » et une tension réduite à 0,4t du côté « petite force ».

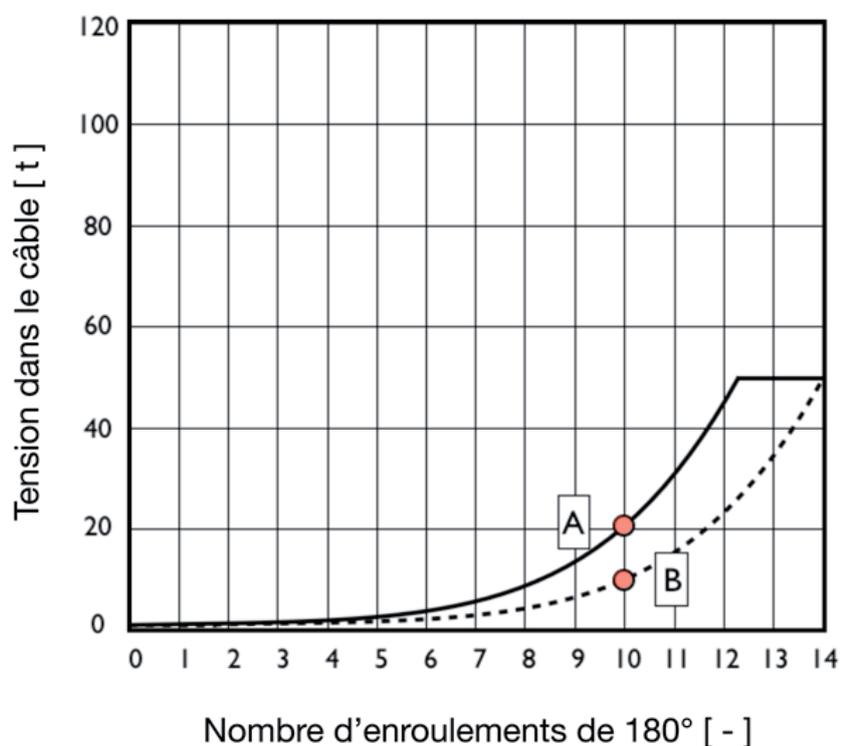


Fig. 9

Les points A et B montrent toujours la tension sur la 10ème poulie, pour un levage (point A) et pour une descente (point B) de la charge.

Il est manifeste que la distance entre le point A et le point B a diminué significativement. La tension pour un levage (point A) est maintenant réduite de 50t à 20,3t, mais elle est toujours plus élevée que la tension en cas de descente de la charge qui reste égale à 10,4t.

Si la tension du côté « petite force » est réduite à 0,205t, les courbes du levage et de la descente de la charge seront identiques, les tensions au point A et au point B seront les mêmes (Fig. 10).

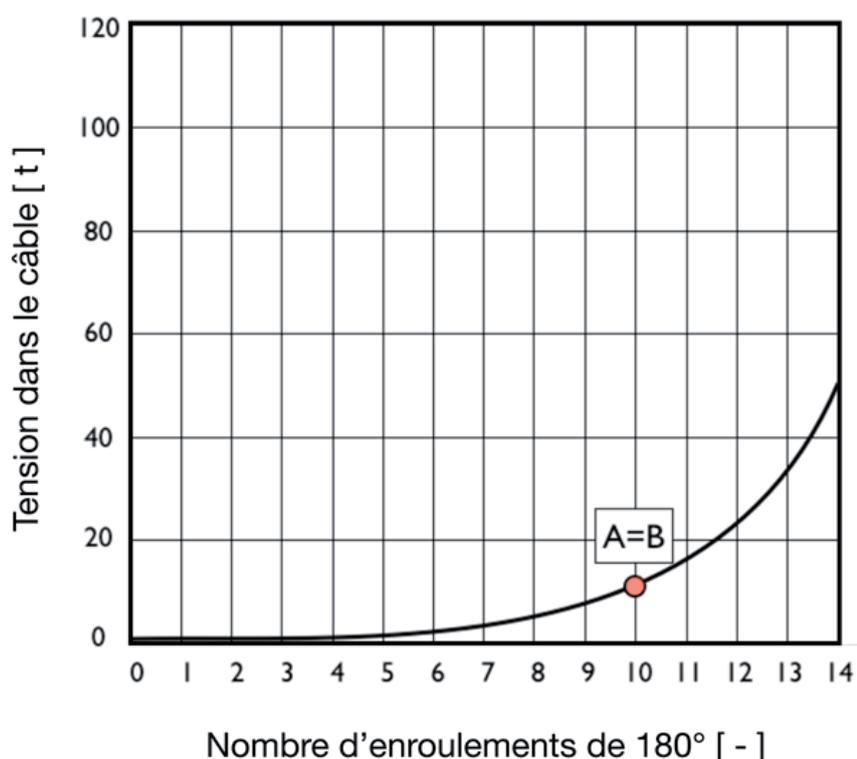


Fig. 10

Une fois que les courbes du levage et de la descente de la charge sont devenues les mêmes, le passage d'un mouvement de montée à un mouvement de descente ne changera pas les tensions dans le cabestan.

Les deux courbes deviennent identiques lorsque la tension du côté « petite force » est égale à la tension du côté « grande force » divisée par le facteur d'amplification ou de réduction de la « boîte noire » (le cabestan).

$$T_1 = T_2 \cdot e^{\mu\alpha} \quad (\text{Formule 2})$$

Ceci signifie que le système devrait toujours être utilisé avec une tension du côté « petite force » égale ou proche de la valeur pour laquelle le câble commence à glisser.

Il doit être mentionné ici que les garnitures de poulie avec un coefficient de frottement plus élevé (par exemple Becorit qui est largement utilisée pour les treuils à adhérence dans l'industrie minière) réduiront énormément le nombre de poulies nécessaires.

Ainsi, gérer la tension du côté « petite force » en fonction de la charge appliquée du côté « grande force », et en même temps utiliser des poulies avec une garniture à haute adhérence permettent de réduire énormément le nombre de poulies et en conséquence la fatigue en flexion générée dans le cabestan.

Un autre avantage d'un cabestan piloté sur la base de la gestion de la tension du côté « petite force », est que cette tension peut être ajustée lors de chaque inversion de sens du mouvement du câble.

Fig. 9 en montre un exemple : quand le système lève la charge, le câble entre sur la poulie 14 et traverse le cabestan vers la poulie 1. Il en résulte une distribution des efforts telle que présentée par la courbe en trait plein. La tension réduit de 50t à 1t.

Quand le mouvement du câble est inversé du fait du passage d'un mouvement de levage à un mouvement de descente de la charge, le câble entre par la poulie 1 et traverse le cabestan vers la poulie 14. La tension passe de 1t à 50t, et la distribution des efforts suit la courbe en trait pointillé. Des tensions à un niveau intermédiaire entre les deux courbes ne seront pas stables, du fait que selon la loi d'Euler-Eytelwein, soit la tension le long du câble est constante, soit elle suit une fonction exponentielle.

Quand ce mouvement est inversé, les sections de câble situées dans le cabestan, par exemple sur la poulie 10, doivent changer leur tension de 20,3t (point A) à 10,4t (point B). Ceci pourra se produire de façon très soudaine, imposant au câble et à tout le système de levage des effets dynamiques importants. Si les écarts de tension sont faibles, l'effet sera quasiment absorbé par l'élasticité du câble.

Cependant, si la tension du côté « petit force » est augmentée juste au moment du changement de sens, la distribution des efforts lors du mouvement de descente suivra la courbe pointillée de la Fig. 11.

En comparaison avec la courbe en pointillée de la Fig. 9, le niveau du chargement est augmenté, ce qui induira une augmentation de la fatigue en flexion, mais les changements de charge lors de l'inversion de sens seront énormément réduits.

Ce point est plus particulièrement explicité sur la Fig. 12, qui présente la superposition des courbes de Fig. 9 et de Fig. 11 avec une échelle adaptée. La ligne en trait plein est la même pour la phase levage des deux configurations. La ligne en trait pointillé court est relative à la descente sans correction du côté « petite force ». La ligne en trait pointillé long est relative à la descente avec correction du côté « petite force ».

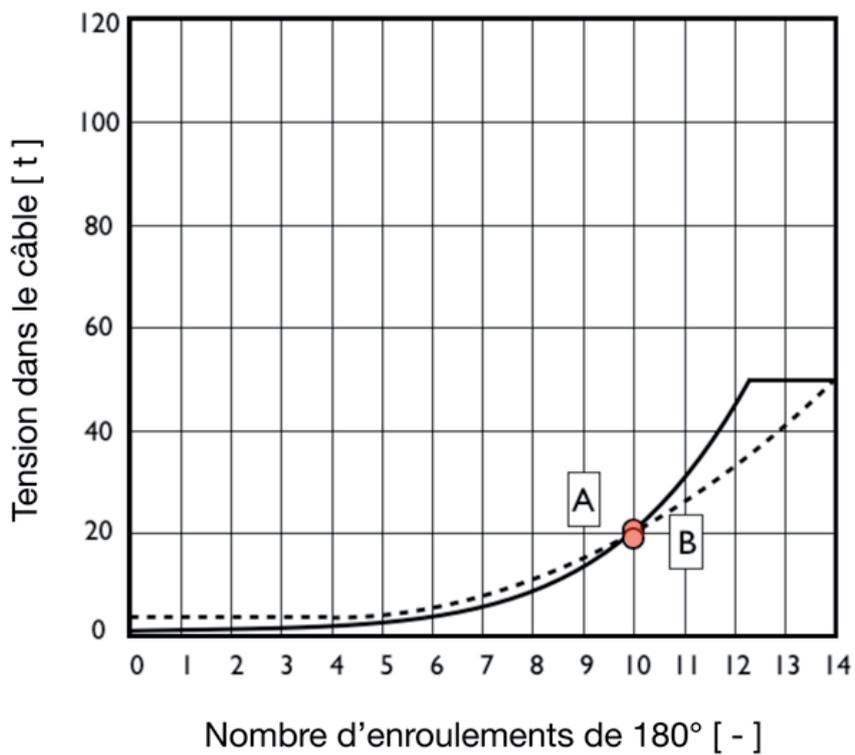


Fig. 11

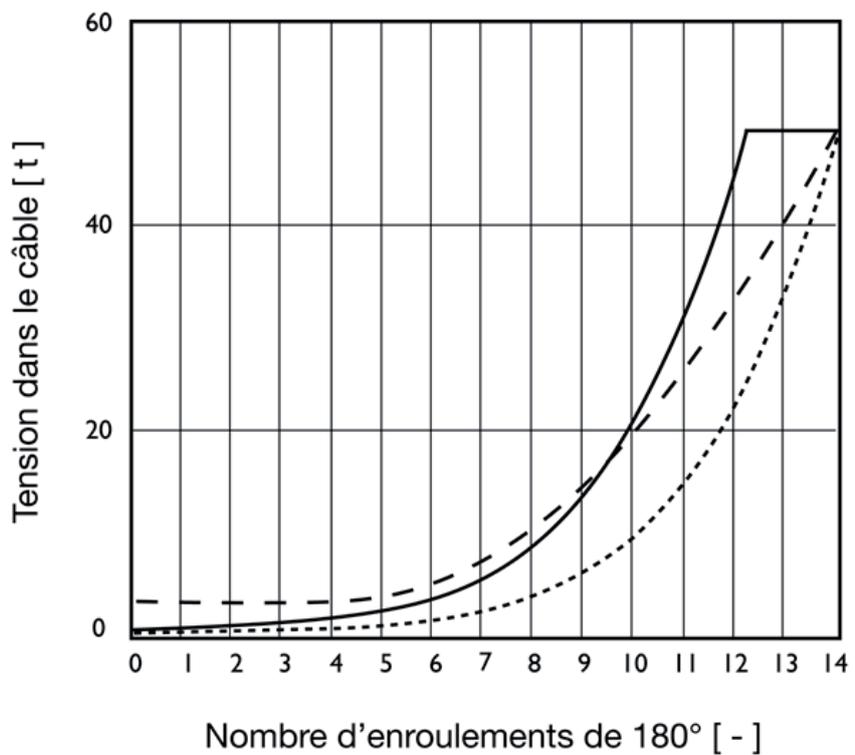


Fig. 12

Ainsi, si le niveau de charge du côté « petite tension » est réduit à un minimum lors du levage et ensuite augmenté pendant la descente, les effets discutés ci-avant peuvent être combinés : le niveau général de charge est plus faible que dans un cabestan sans ce système de gestion, et les variations de charge lors du changement de sens seront également réduites.

L'utilisation du cabestan avec un niveau de chargement proche de celui qui génère la même distribution de tension pour le levage et pour la descente de la charge (voir Fig. 10), mais avec une légère augmentation du niveau de chargement du côté « petite force » lors de la descente de la charge, permettra une réduction à la fois du niveau de chargement et des variations de charge, tout en maintenant le niveau de sécurité du système.

Fig. 13 montre un système à cabestan comprenant une charge, une poulie de trancanage munie d'un capteur d'effort sur son axe et un tambour de stockage.

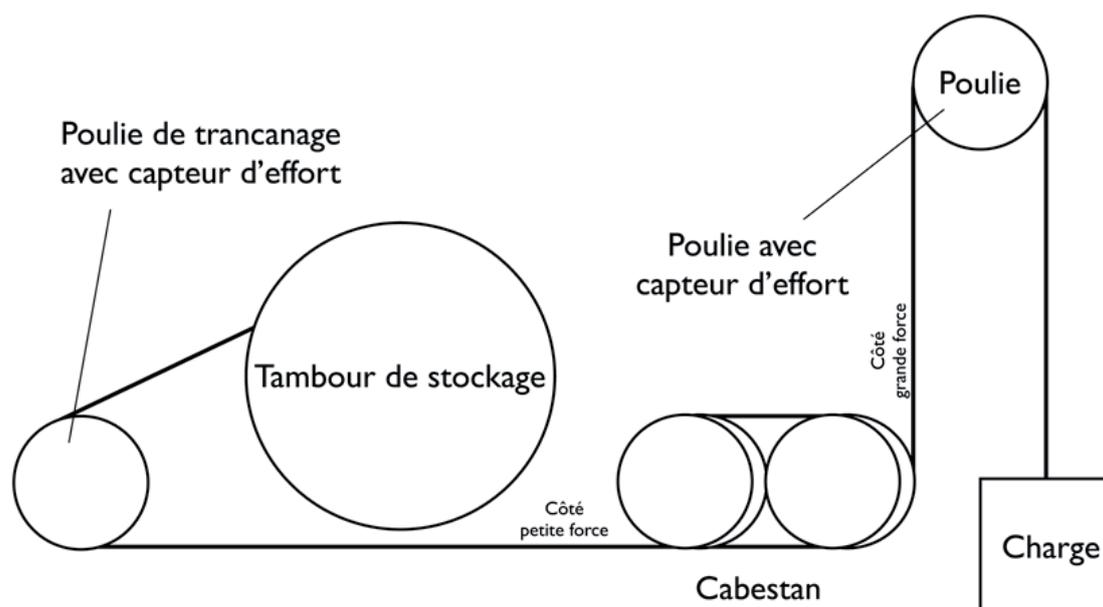


Fig. 13

Pour de simples opérations de manutention de charges, la tension dans le câble du côté « petite force » peut être gérée directement par le tambour de stockage. Mais pour un système de compensation de houle, le tambour de stockage devra continuellement bouger en avant et en arrière, ce qui pose problème compte tenu de sa grande inertie.

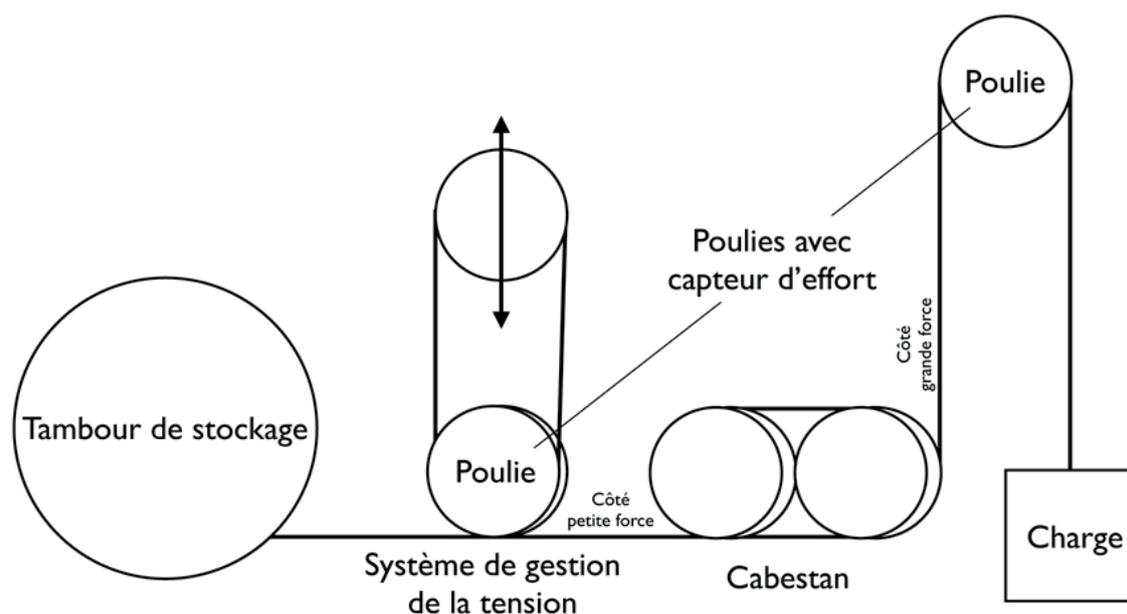


Fig. 14

Il est alors recommandé d'introduire un système de gestion de la tension entre le cabestan et le tambour de stockage (Fig. 14), ce système étant lui-même équipé de capteurs d'effort.

En mode compensation de houle, seuls le cabestan et le système de tension seront mis en mouvement, alors que les grandes masses de la charge et du tambour de stockage avec son câble ne bougeront pas.

Après quelques levages, ou quelques essais, un système intelligent de gestion de la tension connaîtra le coefficient d'amplification ou de réduction du cabestan, et saura même comment ce facteur évolue selon que le câble est sec ou mouillé. Il aura alors juste à mesurer la tension du côté « grande force », la diviser par ce facteur d'amplification ou de réduction afin de déterminer la tension pour laquelle le câble commencera à glisser, et à maintenir la tension du côté « petite force » légèrement au-dessus de cette valeur.

Il est également possible de commencer avec un facteur d'amplification ou de réduction préétabli, qui est ensuite ajusté manuellement jusqu'à ce que le câble commence à glisser. Une légère augmentation de la tension va stopper ce glissement et garantir que le cabestan est utilisé sous des forces optimales.

Il doit être noté que dans un système de compensation de houle, la charge est maintenue en position car seuls les mouvements relatifs entre la charge et le bateau sont compensés.

Il n'y aura donc pas d'effets dynamiques générés par le déplacement de cette charge, et par conséquent les variations de tension dans le câble seront faibles.

Un grand avantage de la solution proposée ici est que les cabestans surdimensionnés existants peuvent être équipés avec ce système de gestion, les rendant capable de travailler avec des mouvements inversés répétés, et sous des tensions dans le câble beaucoup plus faibles. Le nombre d'enroulements autour des poulies du cabestan peut être réduit, le système de gestion de la tension assurant la sécurité du système.

Équipé avec un tel système de gestion de la tension du côté « petite force », un cabestan existant travaillera sous des efforts plus faibles qu'avant. Ceci conduira à une augmentation de la durée de vie du câble, et à une réduction de l'usure à la fois sur le câble et sur les poulies du cabestan.

Il n'y aura plus création de pic de tension à l'intérieur du cabestan, ce qui augmentera significativement le niveau de sécurité du système.

La tension dans le câble sera facilement gérée grâce à la mesure de l'effort du côté « petite force » : le système réagit de manière plus ou moins linéaire.

Il serait par contre beaucoup plus difficile de gérer un cabestan en faisant varier le coefficient de frottement : le système réagirait alors de façon exponentielle.

Si le coefficient de frottement entre le câble et les poulies change, par exemple quand le câble devient humide, il est possible que la tension idéale T_2 ait à changer dans des proportions démesurées. Si le système n'est pas dimensionné pour réagir assez rapidement, il sera préférable d'exploiter le cabestan avec le coefficient de frottement le plus faible qui normalement est celui d'un câble humide.

Ainsi, pour des applications offshores, il peut être favorable de maintenir le câble tout le temps mouillé. Ceci aidera également à réduire la température du câble, même si le fait d'utiliser le cabestan sous un niveau minimum de tension permettra déjà de réduire la chaleur générée pendant la compensation de la houle.

Le système de commande peut également « apprendre » lors d'opérations précédentes, ainsi après quelques utilisations, il sera capable d'ajuster automatiquement les tensions en fonction de nouvelles conditions.

Si un cabestan à double tambour est utilisé dans un système de compensation de houle, le mode de gestion présenté dans ce document permettra de réduire considérablement la chaleur générée lors de l'utilisation.

Dans un système surdimensionné, la tension moyenne (et par conséquent la fatigue et la chaleur) seront très élevées (Fig. 15).

Si le même système est utilisé proche du point de glissement, les tensions (et par conséquent la fatigue et la chaleur) seront très inférieures (Fig. 16).

De plus la chaleur va diminuer au niveau de chaque enroulement de 180° , et créer ainsi un gradient de température. Ceci permettra à la chaleur de s'écouler vers les zones les moins chaudes (Fig. 16).

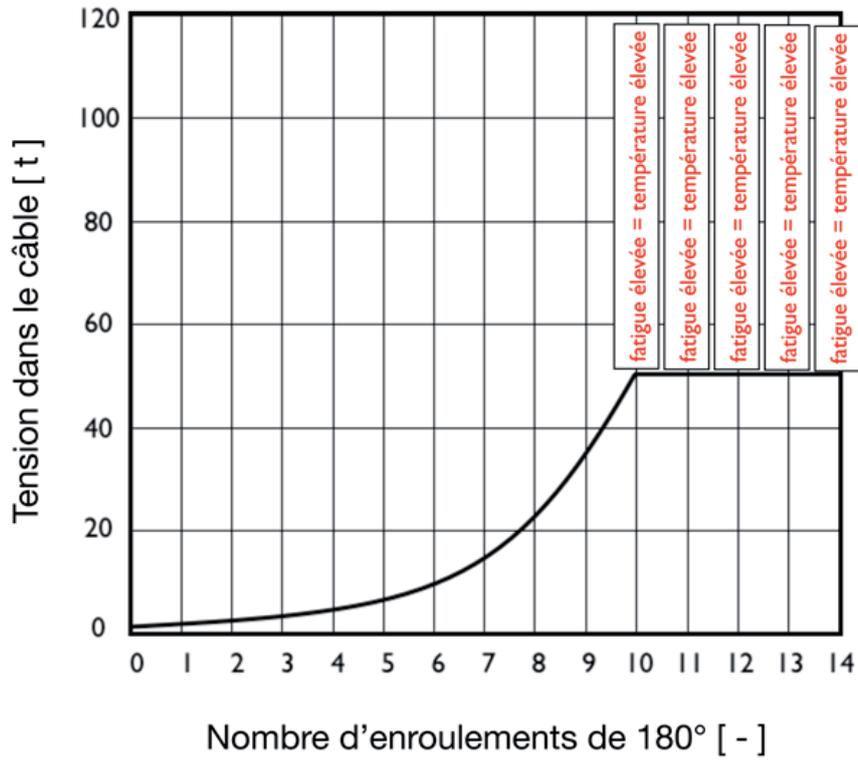


Fig. 15

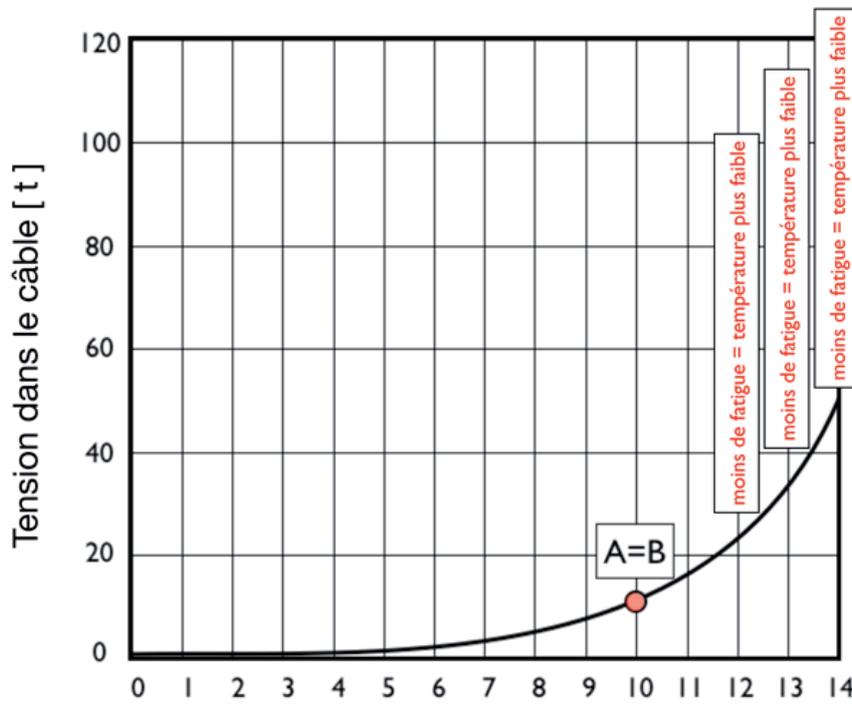


Fig. 16

Un tel gradient ne pourra cependant pas se développer dans un système conventionnel surdimensionné. Si la même chaleur est générée au niveau de chaque enroulement de 180°, il n'y aura pas de gradient de température, et le système va s'échauffer considérablement (Fig. 15).

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

Wire Rope Technology Aachen

Dipl.-Ing. Roland Verreet

Grünenthaler Str. 40a • 52072 Aachen • Germany

Phone: +49 241- 173147 • Fax: +49 241- 12982

Mail: R.Verreet@t-online.de

www.ropetechnology.com