

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE  
DE LA  
**Sécurité des câbles d'extraction**  
en fils métalliques

PAR  
G. BENOIT,

Geheim Hofrat, Professeur, à Karlsruhe (1).

Etant actuellement, en collaboration avec M. Woernle, Ingénieur, occupé à procéder, au laboratoire pour machines de levage de l'Ecole supérieure technique de Karlsruhe, à des expériences pour la détermination de la résistance et de la durée des fils d'un câble métallique, j'ai cru intéressant d'en faire connaître de suite quelques résultats, étant donnée l'importance du rôle que jouent les câbles dans diverses industries, surtout dans l'industrie extractive.

D'ores et déjà, il résulte de nos expériences que les théories bien connues de Bachs, actuellement admises dans les prescriptions officielles, pour les ascenseurs par exemple, doivent être erronées. D'après ces théories, des fils tordus en câble suivant une simple ou une double hélice, sont soumis, lorsque le câble est enroulé sur un tambour, à un travail moins considérable que celui exigé, dans de mêmes conditions, de fils non câblés.

Alors que, comme on sait, Reuleaux, dans son calcul des câbles, négligeait de tenir compte de la forme hélicoïdale affectée par les fils dans le corps du câble et donnait, comme travail de flexion

$$\sigma B = \frac{\delta}{D} E,$$

Bach croyait devoir, pour se rapprocher de la réalité et obtenir pour les câbles, par le calcul, une sécurité correspondant à celle des autres éléments des machines, introduire dans l'équation ci-dessus un coefficient rectificatif :  $\beta = 3/8$ .

(1) Extrait du *Gluckauf* du 23 août 1913. Traduction de G. W.

D'après Isaachsen il serait néanmoins plus exact de calculer le travail des fils d'un câble d'après les vieilles données de Reuleaux :  $\beta = 1$ , ou, pour des fils pliés toujours dans une seule direction :  $\beta = 1/2$ . Il est vrai que, dans les 10<sup>e</sup> et 11<sup>e</sup> éditions de son ouvrage sur les éléments des machines, von Bach conteste l'exactitude des théories d'Isaachsen mais son assertion semble manquer de bases certaines.

Au contraire, Bock a prouvé que les théories d'Isaachsen reposent sur un fondement solide. De plus, suivant le même ordre d'idées que Wehage, il a calculé les tensions et étirages initiaux extraordinaires auxquels sont soumis les fils déjà lors de leur mise en câble, et il part de là pour établir, au sujet de la durée des câbles, une série de conclusions, complètement justifiées à mon avis et que la controverse qu'il a eue avec Speer n'a pas infirmées.

Dans le but de jeter une nouvelle lumière sur ces questions, j'ai entrepris, dans mon laboratoire, diverses expériences dont les premières sont celles de flexion. Je parviens ainsi à déterminer les durées respectives de fils absolument semblables, mais les uns non câblés et les autres mis en câble, soit que ces derniers soient ou non composés de torons, soit qu'ils possèdent ou non une âme en chanvre.

Le fil dont je me suis servi pour mes expériences est un fil en acier fondu de 1 millimètre de diamètre et d'une résistance garantie à la rupture de 160 kilogrammes par millimètre carré. Les épreuves de contrôle auquel il a été procédé ont accusé une force de résistance à la rupture variant entre 174 et 180 kilogrammes par millimètre carré. Les torons soumis aux expériences étaient composés de sept fils de 3<sup>mm</sup>1 de diamètre dont six, de la qualité mentionnée ci-dessus, s'enroulaient autour d'un septième formant âme et d'une résistance moindre (en moyenne 86 kilogrammes par millimètre carré). La charge de rupture des torons s'établit expérimentalement à 805 kilogrammes. Aux essais de solidité, le fil central fortement tendu resta plusieurs fois intact.

Pour les essais de durée à la flexion, nous avons utilisé un câble de 6<sup>mm</sup>8 de diamètre sans âme de chanvre et formé de trois torons du type indiqué ci-dessus, ainsi qu'un câble de 8<sup>mm</sup>5 de diamètre composé de cinq torons et d'une âme en chanvre.

Les fils ou, suivant les cas, les torons ou les câbles, furent disposés, de façon à ne pouvoir glisser, sur un rouleau calé sur un volant; les deux extrémités du câble furent chargées : ou bien directement, chacune d'un poids P, ou bien, au moyen d'un rouleau

inférieur libre formant palan, d'un poids 2P. Le volant portant le rouleau supérieur était mû par un moteur électrique, par l'entremise d'une roue dentée et d'une vis sans fin. Sa vitesse était d'environ, par minute 17, par heure, en chiffres ronds, 1,000 mouvements de va et vient dans un angle d'environ 90°. Les flexions se faisaient donc en partant de la position droite toujours dans la même direction. Nous nous occuperons plus tard de déterminer l'influence des flexions alternatives dans le sens positif et dans le sens négatif; nous accompagnerons ces expériences d'autres dans lesquelles nous ferons fortement varier le diamètre et la nature des rouleaux, les tractions sur les câbles, la composition du câble, de la courroie métallique, etc.

Nous avons admis et compté une flexion du câble, toron ou fil, lorsque celui-ci, partant de la position droite, avait été enroulé autour du rouleau pour revenir à la position droite. L'effort de traction exercé par la charge P a été choisi suffisamment faible pour laisser pleinement apparaître l'influence des flexions, mais, d'autre part, il était néanmoins suffisant (environ 8 kilogrammes par millimètre carré) pour que, dans tous les cas, le fil, toron ou câble, adopte certainement le rayon de courbure imposé par le rouleau.

Lorsque l'expérience porte sur des fils et que l'un d'eux vient à se briser, le moteur s'arrête automatiquement de façon à donner toute valeur à la constatation du nombre de flexions qui se fait sur le compteur. Lorsqu'il s'agit de câbles, la situation de ceux-ci est notée, soit d'heure en heure, soit de deux heures en deux heures, de sorte que le nombre de flexions constaté à la rupture du câble ne peut en tout cas être inférieur au nombre réel que d'environ 1,000 ou 2,000. Ce système permet de comparer de façon frappante la résistance des fils mis en câble avec celle des fils isolés et de remarquer combien celle-ci est supérieure à celle-là.

Les nombres de flexions concernent des fils, torons ou câbles enroulés autour des rouleaux supérieurs en zinc ou en fonte et soigneusement tournés. Quant au rouleau inférieur, nous avons procédé sur lui à des essais sur lesquels nous ne nous étendrons pas ici et dont le but était de déterminer l'influence de la position du rouleau sur le nombre de flexions. Ces expériences ont démontré que l'état du rouleau avait beaucoup d'influence sur les fils et câbles dont la durée sur un rouleau imparfaitement dégrossi était moins de moitié de ce qu'elle était sur le rouleau supérieur soigneusement tourné. Il convient également de noter que les torons et câbles qui étaient

toujours généreusement lubrifiés n'ont jamais présenté des traces d'altération sur le rouleau par suite de l'usure des fils produite soit par le rouleau, soit par leur frottement les uns sur les autres. Ajoutons que les bris ont affecté toute l'étendue du câble, de sorte que les ruptures étaient bien causées par la fatigue des câbles.

Lors du premier essai, qui portait sur un fil de la catégorie mentionnée plus haut, le diamètre du rouleau était de 175<sup>mm</sup>4. Le rayon de courbure du centre du fil était donc 88<sup>mm</sup>2. Il en résulte que la

tension de flexion était  $\sigma_B = \frac{1 \times 20,000}{176.4} = 113.4$  et la ten-

sion totale :  $\sigma_B + \sigma_Z =$  environ 121 kilogrammes par millimètre carré. La rupture eut lieu après 148,710 flexions.

L'épreuve de comparaison se fit, au moyen du même rouleau, sur un toron du type déterminé ci-dessus et pour lequel on aurait trouvé un effort total, suivant Reuleaux de 120 kilogrammes par millimètre carré environ et suivant von Bach ( $\beta = \frac{2}{3}$ ) de 50 kilog. par millimètre carré environ. Déjà après 44,800 flexions il se produisit une rupture de fil de chaque côté du rouleau dans la zone des flexions alternatives. L'épreuve recommencée dans les mêmes conditions donna pour résultat une rupture de fil après 47,190 flexions et une autre après 48,480 flexions.

Nous avons ensuite procédé à de nouvelles expériences comparatives et avons employé dans ce but un rouleau de 180<sup>mm</sup>4 de diamètre. La tension était de nouveau, dans tous les cas, de 8 kilog. par millimètre carré. Le nombre de flexions nécessaires pour amener la rupture des fils non câblés varia entre 122,040 et 210,790.

Pour ce qui concerne le toron, nous y constatâmes, après 40,860 flexions, à l'un des côtés du rouleau, deux ruptures de fils, et à l'autre, une. L'expérience en resta là.

Le câble à trois torons sans âme en chanvre avait déjà un de ses fils rompu après 22,860 flexions. Lorsque, après un total de 36,460 flexions, nous mîmes fin à l'expérience, le câble était presque complètement détruit : il montrait à droite sept, à gauche douze ruptures de fils.

Quant au câble à cinq torons, ses fils commencèrent à se rompre après 35,000 flexions. Après 40,160 flexions les ruptures se succédèrent si rapidement qu'il fut jugé inutile de continuer plus longtemps l'expérience.

La durée remarquablement courte des fils du câble comparative-

ment à celle des fils non câblés devant, à mon avis, être attribuée aux tensions préalables occasionnées par la mise en câble, nous résolûmes de recommencer de nouvelles expériences sur des fils recuits, de façon à éliminer l'influence de ces tensions préalables sur les torons et les câbles. Dans ces conditions, il fallait évidemment renoncer aux expériences comparatives sur le câble à cinq torons avec âme en chanvre.

Le recuit ramena la force de résistance à la rupture des fils non câblés à environ 93 kilogrammes par millimètre carré.

Les expériences se firent au moyen du même rouleau de 180<sup>mm</sup>4 de diamètre et les résultats en furent les suivants :

Le fil isolé se brisa après 47,700 flexions. Le toron accusa une rupture de fil après 37,210 flexions, trois après 42,000 et, en tout, huit après 43,230 flexions. Après 44,740 flexions, le toron était complètement détruit. Dans le câble à trois torons, la première rupture apparut à gauche après 15,440 flexions, à droite après 17,460. Après un total de 21,850 flexions, le câble, presque entièrement détruit, dut être mis de côté.

Nous avons encore procédé à d'autres expériences parallèles sur métal recuit avec des précautions toutes spéciales : les fils furent soumis à une température moindre mais cependant suffisante pour que la tension initiale fût certainement supprimée. L'effet désiré fut obtenu puisqu'après la section d'un toron (sans déliage) tous les fils gardèrent exactement la place qu'ils occupaient dans le câble.

Avec matière recuite nous n'avons plus eu ces grandes différences entre le nombre de flexions pour fils câblés et celui pour fils non câblés. C'était d'ailleurs le résultat que nous attendions. Les fils non câblés furent réunis à six l'un contre l'autre, en un faisceau auquel on suspendit, comme cela avait été fait pour les torons, un poids ; celui-ci ne changea pas, dans les deux cas, de toute la durée de l'expérience, de sorte que la charge initiale, en elle-même peu considérable (dans ce cas 7<sup>k</sup>65 par millimètre carré), augmentait au fur et à mesure de la rupture des fils. On avait mis un soin spécial à répartir toujours également la charge entre tous les fils du faisceau.

Les fils non câblés se brisèrent après 47,700, 53,520, 55,130, 69,900 flexions, les deux derniers fils cédant après 70,980 flexions.

Lors de l'essai des torons, il y eut un fil brisé à droite et un à gauche après 50,850 flexions ; après 55,490 il y avait trois ruptures à droite et deux à gauche ; après 68,020, six à droite, quatre à gauche ; après 70,020, l'essai dut être interrompu, le toron s'étant

déchiré à gauche tandis qu'à droite deux fils restaient encore intacts.

La courte durée des fils recuits ou non composant le câble à trois torons est particulièrement remarquable. Il semble qu'il faille l'attribuer à un désavantage particulier de ce genre de câble, par exemple une pression défavorable des surfaces aussi bien entre le câble et le rouleau qu'entre les divers torons, bien que nous n'ayons pu remarquer aucune trace d'usure en ces endroits.

Quoi qu'il en soit, il semble que l'on puisse déjà tirer des résultats exposés ci-dessus la conclusion que de toutes façons il n'est pas exact de rectifier, comme le fait von Bach, l'équation de Reuleaux par l'introduction d'un coefficient plus petit que 1. Cette façon de faire fait attribuer aux câbles une sécurité bien supérieure à celle qu'ils possèdent réellement. Même dans les câbles faibles en fer qui, très vraisemblablement se comportent de la même façon que ceux en acier recuit, il n'y a aucune raison pour supposer que les fils sont moins mis à contribution dans le câble que l'équation de Reuleaux ne l'indique. Au contraire, pour ce qui concerne les câbles en fils d'acier tels qu'on les emploie maintenant presque exclusivement pour les appareils de levage et, surtout, dans les mines, il est dès à présent certain, si on se fonde sur le résultat de nos expériences, que les modes de calcul actuels, même basés sur la formule de Reuleaux, ne correspondent pas aux efforts indubitablement extraordinaires auxquels les câbles sont soumis pendant le travail.

Nous poursuivons maintenant nos expériences sur des câbles et des tambours de dimensions beaucoup plus fortes, répondant aux conditions de la pratique, ainsi que sur divers genres de fils métalliques. Nous comptons publier plus tard le résultat de nos nouvelles expériences.

