NOTE

SUR LES

EFFORTS DANS LES CABLES

PAR

M. E. DESSALLES

Ingénieur au Corps des Mines, à Charleroi.

On sait de quelle importance est la question des câbles de mine. Leur calcul, leur entretien, leur contrôle, leur physiologie présentent de grandes difficultés.

Le calcul des efforts statiques est simple ; mais c'est rarement sous des charges de cette nature que les câbles se brisent ; ce sont les efforts dynamiques qu'il faut craindre.

Parmi ces efforts, on peut distinguer :

1° *Les chocs :* ils peuvent être dus à des causes diverses : reprise brusque du « lâche » d'un câble ; chute d'un corps sur la cage ; rencontre de cages ; défauts dans le guidage.

2° *Les variations de tension* dues aux accélérations positives ou négatives des masses en mouvement : démarrages rapides ou freinages brusques.

L'imperfection de la théorie du choc ne permet pas d'étudier aisément les câbles au point de vue dynamique. La plupart des traités de résistance des matériaux calculent les effets d'un choc, en supposant que sa vitesse de propagation est infinie ; de sorte que si un fil suspendu à une extrémité vient à subir, à sa partie inférieure, un choc, l'effet de celui-ci se fait sentir sur tout le câble. Cette hypothèse, admissible tant qu'il s'agit de fils de faible longueur, ne l'est plus pour les longs câbles utilisés dans nos puits. Malheureusement, si l'on veut tenir compte de la vitesse de propagation du choc, la question des efforts subis par un câble, par suite d'actions brusques, présente de grandes difficultés et n'est pas traitée, à ma connaissance, dans les ouvrages classiques.

En admettant l'hypothèse indiquée plus haut, et en appliquant la théorie de la résistance vive (théorie vivement combattue par l'éminent professeur de l'Université de Toulouse, M. Bonasse), on établit que si on appelle T le travail élastique dont est capable un câble de section S, de longueur L, de coefficient d'élasticité E, soumis à une tension N,

$$T = \frac{N^2 \times l}{2 \times E \times S} \quad (1).$$

De cette formule, il résulte que, toutes choses égales d'ailleurs, un câble serait capable d'absorber un choc d'autant plus grand que lui-même serait plus long. Cette conclusion a été invoquée par les partisans de la réduction des coefficients de sécurité pour les grandes profondeurs.

Si on tient compte, au contraire, du fait que la vitesse de transmission du choc est limitée, égale à V par exemple, si Δt est la durée très petite d'un choc, seule une longueur $l = V \times \Delta t$ participera à l'allongement et on aura :

$$T = \frac{N^2 \times V \times \Delta t}{2 \times E \times S'} \quad (2).$$

Comme il s'agit d'efforts brusquement appliqués, la résistance des matériaux nous enseigne que nous ne pouvons admettre pour N maximum qu'une tension correspondant à un allongement inférieur à la moitié de l'allongement élastique ; on déterminerait cet allongement par des essais ordinaires de traction, avec relevé de diagrammes, essais effectués sur les fils ; on pourrait alors, connaissant S, E, V faire différentes hypothèses sur Δt (durée du choc) et voir quelle quantité de travail le câble est susceptible d'absorber, sans se déformer d'une façon permanente. La valeur de Δt est difficile à évaluer dans le cas des chocs proprement dits ; pour les efforts dynamiques brusques, assimilables aux chocs, tels que freinage brusque, renversement de la vapeur, on peut faire des hypothèses se rapprochant assez bien de la réalité.

Mais pour appliquer la formule (2), il importe de connaître la valeur de V. La vitesse de la propagation du choc dans un corps homogène est donnée par la formule bien connue :

$$V = \sqrt{\frac{E}{\delta}}$$

E étant le coefficient d'élasticité de la matière, en kilogrammes par mètre carré dans le système kilogramme, mètre, seconde ;
δ étant la masse spécifique ou masse de 1 mètre cube.

Cette formule peut-ellle être appliquée à un corps non homogène, comme un câble ? La question ne pouvait être tranchée que par des expériences.

M. Canivet, directeur des travaux, au charbonnage de Monceau-Fontaine, qui, depuis de nombreuses années, a eu l'attention attirée sur la détermination des efforts dans les câbles, entreprit ces expériences d'une façon très ingénieuse ; elles le conduisirent à d'autres recherches que j'exposerai ci-après.

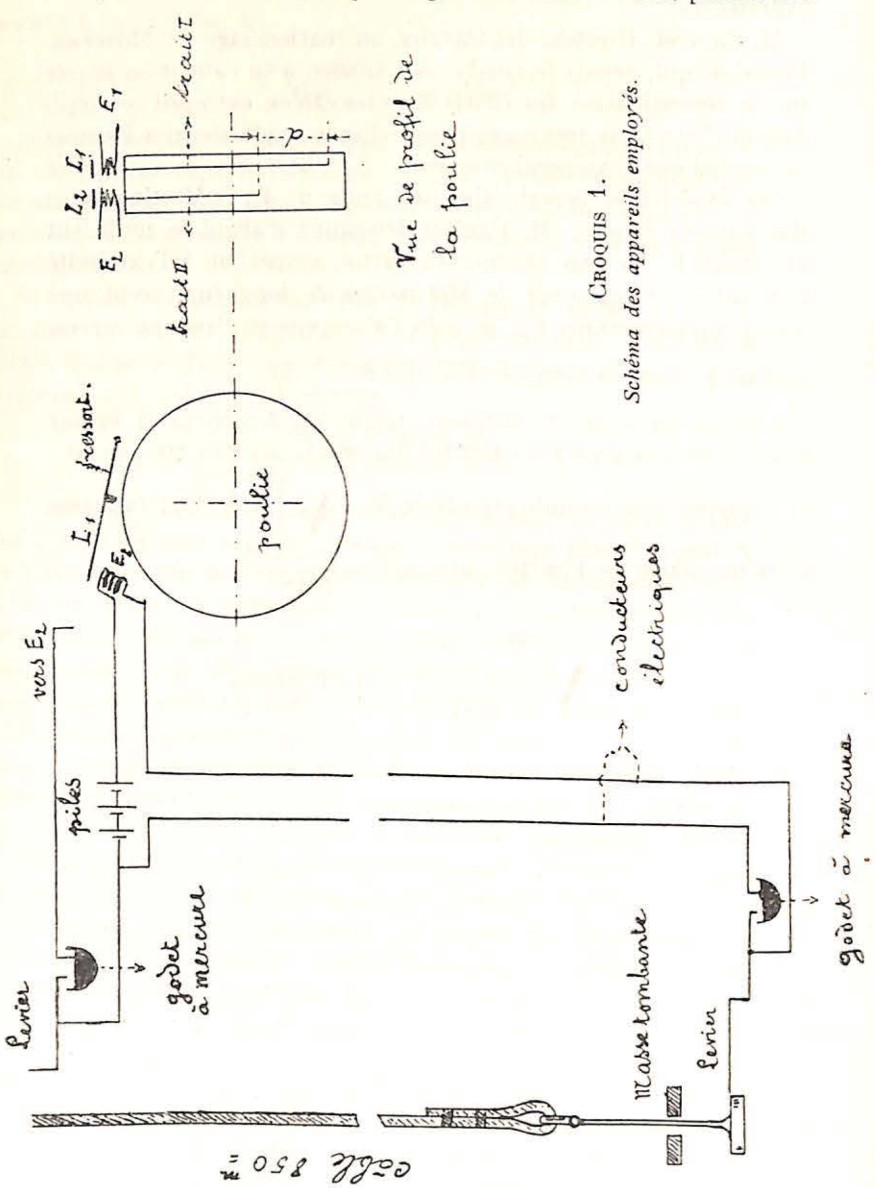
Ces expériences furent faites au puits n° 4 : « Martinet », à Monceau-sur Sambre. M. Canivet détermina d'abord le coefficient d'élasticité E. La cage chargée en partie, suspendue à l'extrémité d'un câble plat en acier de 850 mètres de longueur, reçut une charge supplémentaire F ; on nota l'allongement élastique correspondant λ et par la formule : $F = E \cdot S \cdot \frac{\lambda}{l}$.

S section du câble, l : longueur totale, on détermina la valeur de E, on trouva ainsi E = 15000 kilog./mm², soit 15×10^9 par m² ; en appliquant la formule précédente $V = \sqrt{\frac{E}{\delta}}$, δ étant la masse unitaire, masse de 1 mètre cube, soit $\frac{7.5 \times 10^3}{9.18}$, d'où :

$$V = \sqrt{\frac{15 \times 10^9}{\frac{7.5 \times 10^3}{9.18}}} = 4420 \text{ mètres.}$$

M. Canivet mesura ensuite directement cette vitesse par la méthode suivante, dont je me contente de donner le principe, avec la disposition schématique des appareils employés.

On laisse tomber sur une tige figurée au croquis 1, suspendue à la patte d'un câble de 850 mètres de longueur, une masse donnant un choc assez important (voir croquis 1) ; la masse ferme en tombant un circuit électrique allant jusqu'à la surface ; en cet endroit, dans le circuit, est intercalé un électro-aimant I dont l'armature porte un crayon ; celui-ci est placé au-dessus de la jante d'une poulie tournant avec une vitesse constante assez grande ; sur la jante de la poulie est fixée une bande de papier de telle sorte que, quand le choc se donne à la patte, le crayon s'abaisse sur la poulie et y trace un trait continu. Quand l'ébranlement dû au choc arrive à la surface, le câble subit un effort de traction qui provoque la fermeture d'un second circuit électrique, par un dispositif qui sera mentionné plus loin ; ce second circuit comporte également un électro II, placé à côté



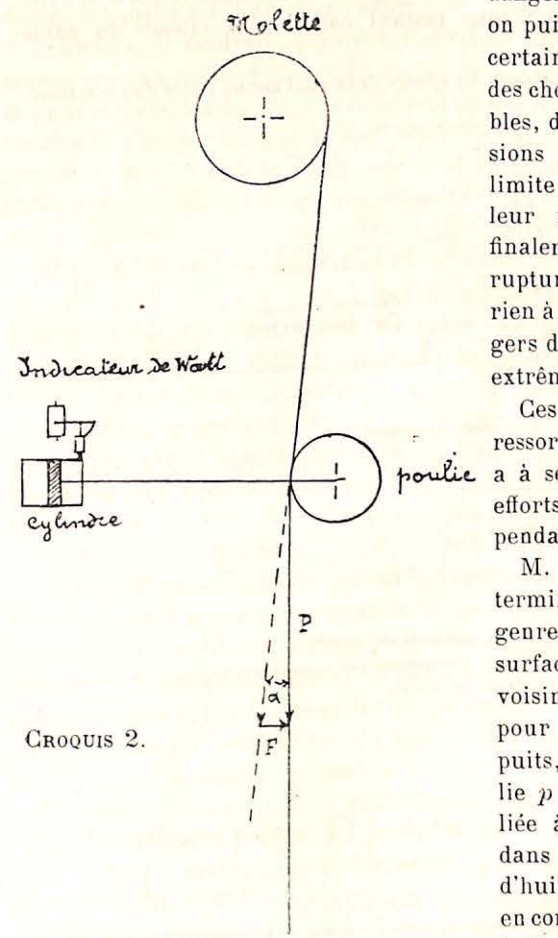
Croquis 1.
Schéma des appareils employés.

de I ; par l'abaissement de l'armature de II, une seconde ligne parallèle à la première est tracée sur la jaute de la poulie ; la distance qui

sépare les points initiaux de ces lignes est égale à la vitesse de la jaute multipliée par le temps, mis par le choc à se propager de la patte à la surface. Un calcul simple permet alors de trouver la vitesse de propagation.

M. Canivet a trouvé de cette façon, lors d'expériences auxquelles j'ai assisté, des nombres voisins de 4,500 mètres.

L'application des formules précédentes permettrait donc de voir si, sous l'action de chocs et d'efforts dynamiques, le câble dépasserait sa limite d'élasticité ; on pourrait étendre la méthode jusqu'à considérer la rupture du câble, mais il convient de remarquer que le plus grand danger et le seul auquel on puisse parer dans une certaine mesure, est celui des chocs relativement faibles, déterminant des tensions supérieures à la limite d'élasticité, qui, par leur répétition, doivent finalement provoquer la rupture. Il n'y a d'ailleurs rien à faire contre les dangers des chocs de violence extrême.

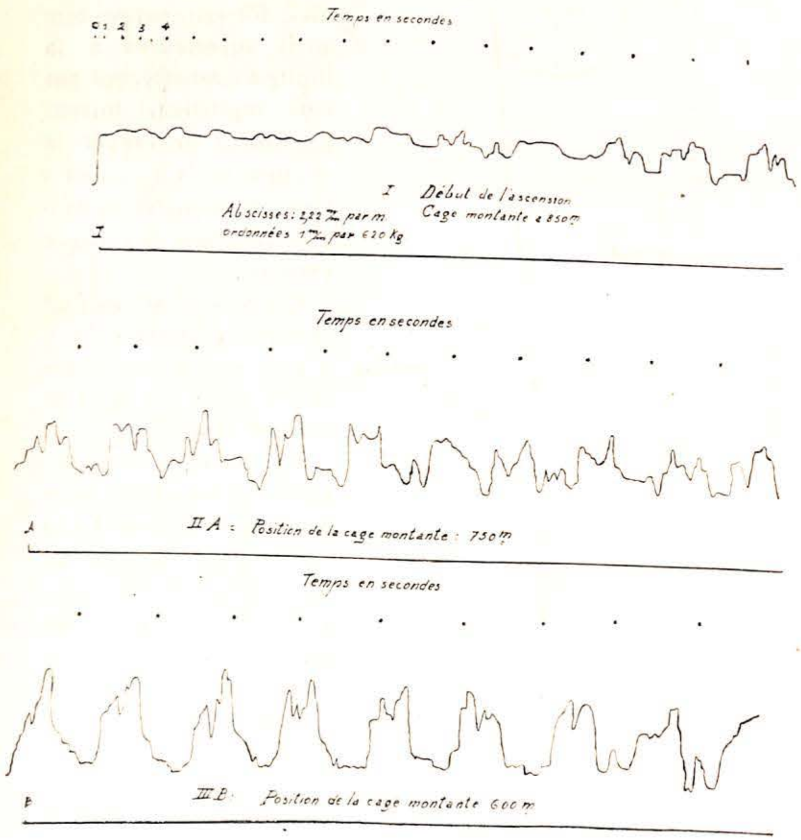


Croquis 2.

Ces considérations font ressortir l'intérêt qu'il y a à se rendre compte des efforts subis par le câble pendant la marche.

M. Canivet a voulu déterminer les efforts de ce genre se manifestant à la surface, par exemple, au voisinage des molettes ; pour cela, à l'orifice du puits, il installe une poulie p (voir croquis 2) reliée à un piston glissant dans un cylindre rempli d'huile ; ce cylindre est en communication avec un indicateur de Watt, comme le montre le croquis. Avant de mettre la cage en mouvement, on fait dévier le câble, au moyen de tendeurs à vis, en tirant sur le cylindre et en le calant dans une position déterminée. Comme on le voit aisément : F = P $tg\,\varphi$; si on met donc la machine en marche, l'indicateur de Watt tracera sur le papier une courbe dont les ordonnées seront proportionnelles à P ; en même temps, on fera dérouler le papier proportionnellement à la longueur de câble enroulée, en entraînant le tambour de l'indicateur, par le mouvement de l'axe de la poulie p. M. Canivet enregistrait en outre, sur le même diagramme, les secondes, au moyen d'une pendule battant la seconde, lequel fermait et ouvrait un circuit électrique avec électro à armature porte-crayon ; on pouvait ainsi, à chaque instant calculer la vitesse du câble ;

Croquis 3. — *Diagrammes des efforts s'exerçant sur un câble d'extraction.*



celle-ci était en effet proportionnelle à la distance séparant deux traits consécutifs, indicateurs de secondes. Disons, en passant, que c'était par l'intermédiaire de l'indicateur de Watt qu'on fermait le circuit électrique de la surface, dans les expériences sur la vitesse de propagation du choc.

Des parties du diagramme relevé au moyen de cet appareil, sont figurées au croquis 3 ; ce diagramme montre que durant l'extraction, des efforts variant d'une façon périodique (pour une machine à vapeur) s'exercent sur le câble ; certains efforts maxima semblent atteindre 1, 3 l'effort initial, tandis que les efforts minima paraissent descendre jusqu'à 1/3 du même effort.

Toutefois, il faudrait se garder d'attribuer des grandeurs numériques précises aux ordonnées du diagramme. En effet, si les oscillations transversales du câble le fatiguent de même que les oscillations longitudinales, par suite de la disposition de l'appareil, les premières paraissent devoir se manifester, sur le diagramme, par des amplitudes beaucoup plus grandes que celles dues aux secondes, pour un même effort subi par le câble. Aussi, M. Canivet avait-il commencé de nouveaux essais, en supprimant l'influence des oscillations transversales. Pour cela, il plaçait à quelques mètres sous la poulie p, tangentiellement à l'autre face du câble, une poulie fixe. Il obtint ainsi un diagramme, malheureusement égaré, dans lequel les oscillations étaient moins nombreuses et les variations des amplitudes plus faibles. Seulement, dans ce cas, il est certain que les efforts enregistrés par le diagramme sont inférieurs aux efforts réels, car d'une part, on élimine les effets des oscillations transversales et, d'autre part, l'inertie de la nouvelle poulie amortit les effets des oscillations longitudinales.

Quoi qu'il en soit de la valeur quantitative du diagramme, il pourrait servir à comparer qualitativement les machines à vapeur, à bobines ou à tambour, les machines électriques, les câbles en alois et en acier. J'estime que c'est là un très grand progrès. La mécanique nous permettait bien d'étudier les câbles au point de vue dynamique, en négligeant les oscillations ; on sait en effet que la tension T dans une section déterminée est égale à $T = F + m\varphi$;

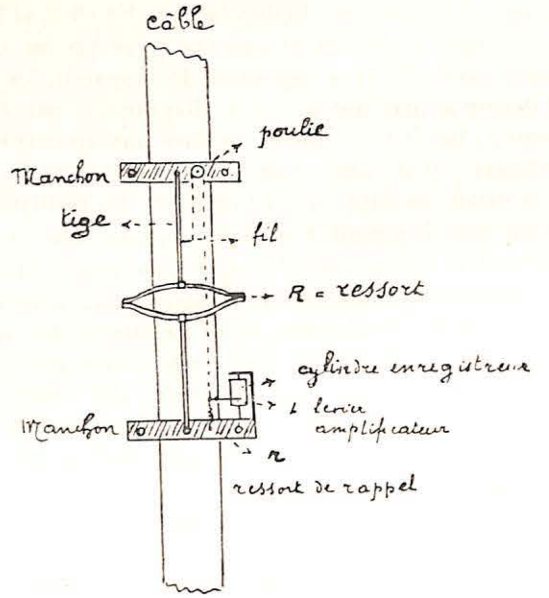
F = effort statique dans la section considérée,

$m\varphi$ = effort accélérateur à la remonte ou

effort retardateur à la descente, pour les tensions maxima.

de sorte qu'il suffit de déterminer φ, accélération à un instant donné, pour évaluer T ; pour une machine donnée, on peut calculer φ d'une façon assez exacte. Dans certains cas exceptionnels, par suite de manœuvres anormales ou par l'emploi de machines trop puissantes, T, ainsi calculé, a pu atteindre 1,5 la valeur de F, et comme une partie de cet effort 0,5 F était appliqué brusquement, elle donnait lieu à un allongement au moins égal à celui que donnait déjà F ; on a pu expliquer de cette manière certaines ruptures. Cependant, on n'abordait ainsi qu'un des aspects mécaniques du problème. On savait l'effet désastreux des vibrations dans les câbles, notamment le danger de la superposition des oscillations ou du phénomène de résonance, entre la périodicité du couple moteur et

FIG. 4. — *Schéma d'un dinamomètre enregistreur.*



celle des oscillations propres du câble (on se rappelle les accidents dus à des phénomènes de ce genre arrivés à des ponts suspendus) ; mais on ne pouvait mettre le problème en équation, la question étant trop complexe. Les essais de M. Canivet, sans la résoudre complètement, fournissent déjà des indications intéressantes. En dehors des comparaisons que l'appareil décrit permet de faire comme je l'ai indiqué plus haut, il fournit aussi le moyen d'étudier le réglage des appareils d'extraction, l'enroulement des câbles, la

qualité du guidage. On pourrait, à ces titres, l'appeler un « analyseur d'efforts ».

Cet appareil n'enregistre cependant pas les efforts, dans une même section, pendant la durée d'une ascension ou d'une descente. Je pense qu'on pourrait arriver à ce résultat au moyen d'un dynamomètre enregistreur ; ce dynamomètre serait disposé comme l'indique le schéma qui constitue le croquis 4 ; entre 2 manchons fixés sur le câble, on placerait le dynamomètre qui inscrirait sur un tambour enregistreur les allongements de la partie comprise entre les 2 manchons ; les allongements pourraient être amplifiés par un levier ; le tambour enregistreur serait mû par un mouvement d'horlogerie. On aurait ainsi un diagramme qualitatif des efforts en une section quelconque du câble ; on pourrait relever le même diagramme pour un grand nombre de sections et trouver le maximum maximorum des efforts. Pour obtenir des résultats quantitatifs, on fixerait le dynamomètre, sur une éprouvette placée au banc d'essai, et on comparerait le diagramme, ainsi obtenu, aux diagrammes relevés sur le câble en marche. Peut-être, pourrait-on remplacer le dynamomètre par un fil dont on enregistrerait la variation de résistance électrique (voir HUBERT, H. *Cours de Mécanique*, tome I) ; des piles et un galvanomètre enregistreur de faibles dimensions, pourraient être fixés sur les manchons.

Telles sont les considérations que j'ai été amené à émettre à la suite des expériences de M. Canivet. Il y a lieu de féliciter cet ingénieur d'avoir tenté d'éclairer, en s'inspirant de méthodes scientifiques, la question si obscure des câbles, dans laquelle l'empirisme ou des hérésies mécaniques, telles que la « marge de résistance », d'importation étrangère, faisaient loi jusqu'à présent.
