

Rapport sur les essais de fatigue sur fils de câbles d'extraction exécutés au moyen du Vibrophore Amsler 2 tonnes

ASSOCIATION DES INDUSTRIELS DE BELGIQUE

TABLE DES MATIERES

- | | |
|---|--|
| 1. But initial des essais | II. limites de tensions de $26 - (R/20)$ à $94 + (R/20)$ kg/mm ² |
| 2. Machine utilisée | 8. Choix d'une orientation pour les essais ultérieurs |
| 3. Avant-propos statistique | 9. Essais réalisés entre les limites de tensions : $26 - (R/9)$ et $94 + (R/9)$ kg/mm ² |
| 4. Essais préliminaires — facteurs de dispersion | 1) galvanisés — \varnothing 2 mm |
| 5. Essais effectués avec mainteneur des charges | 2) clairs — \varnothing 2 mm et \varnothing 3 mm |
| 6. Modification de la recherche | 10. Conclusions. |
| 7. Essais préliminaires sur fils neufs | |
| I. limites de tensions de 14 à 106 kg/mm ² | |

SAMENVATTING

Bij herhaling werd vastgesteld dat de draden van de ophaalkabels barsten en breuken kunnen vertonen door vermoeinis (zeer vaak herhaalde mechanische sollicitaties).

Deze vaststelling beklemtoont het belang van een betere kennis van de eigenschappen der draden ten opzichte van het vermoeiingsverschijnsel, door de uitvoering der vermoeiingsproeven, ten zelfden titel als de gebruikelijke trek-, buig- en torsieproeven.

In het raam van het plan Guérin werden, met de steun van het Nationaal Instituut voor de Steenkolenijverheid, opzoekingen verricht met het uiteindelijke doel de bedrijfszekerheid van de kabels te verhogen.

Voorafgaandelijke proeven bewezen dat men rekening moest houden met een zekere dispersie van de uitslagen der vermoeiingsproeven, dat bijgevolg het aantal monsters dat aan de proeven moest onderworpen worden aanzienlijk was en te groot om de methode te kunnen toepassen op draden opgenomen uit ophaalkabels in dienst.

Het opzoekingsplan werd dus georiënteerd in de zin van de studie der vermoeiingsverschijnselen op nieuwe draden.

De talrijke uitgevoerde proeven hebben de merkelijke voordelen doen uitschijnen van deze methode ter beoordeling van de kwaliteit en de homogeneïteit van een lot draden ten opzichte van sollicitaties die van dezelfde aard zijn als degene waaraan ze onderworpen zijn tijdens hun dienst.

Alhoewel de uitslagen verkregen in het raam van de opzoekingen noodzakelijkerwijze beperkt zijn, bewijzen ze dat er een aanzienlijk belang schuilt in de verdere ontwikkeling van deze beproevings-techniek, die werkelijk van aard is om de veiligheid van het gebruik der ophaalkabels te verhogen.

RESUME

Il a été constaté, à de nombreuses reprises, que les fils des câbles d'extraction pouvaient se fissurer et rompre par fatigue (sollicitations mécaniques répétées de très nombreuses fois).

Cette constatation soulignait l'intérêt qu'il y aurait à mieux connaître les propriétés des fils à la fatigue en pratiquant sur ces fils des essais dits de fatigue, au même titre que les essais courants de traction, torsion et flexion.

Une recherche fut entamée dans le cadre du Plan Guérin avec l'appui d'INICHAR, avec, comme but final, l'amélioration de la sécurité de fonctionnement des câbles.

Des essais préliminaires montrèrent qu'il fallait tenir compte d'une certaine dispersion des résultats des essais de fatigue et que, dès lors, le nombre d'éprouvettes à soumettre aux essais devenait important, trop important, que pour permettre d'appliquer la méthode aux dépens de fils prélevés sur des câbles en service.

Le plan de recherche fut donc modifié dans le sens de l'étude de la fatigue sur fils à l'état neuf.

Les nombreux essais effectués ont mis en évidence des avantages appréciables qui font de cette méthode un outil de choix pour juger de la qualité et de l'homogénéité d'un lot de fils vis-à-vis de sollicitations d'un type semblable à celles que ces fils subissent en service.

Bien que les résultats obtenus dans le cadre de la recherche soient forcément limités, ils montrent qu'il y a gros à gagner à pousser plus avant cette technique d'essai qui est réellement susceptible de renforcer la sécurité de fonctionnement des câbles.

1. But initial des essais.

Le but des essais est la mesure de la résistance à la fatigue des fils des câbles d'extraction; on recherche les facteurs pouvant influencer cette résistance (résistance unitaire des fils, diamètre, clair ou galvanisé, etc...).

Après élimination des facteurs parasites pouvant modifier les résultats, la dispersion de ceux-ci peut servir de mesure à l'hétérogénéité du lot de fils essayés.

Les buts définis ci-dessus correspondent d'ailleurs à la constatation que certaines ruptures de fils (et même de câbles entiers) ont la fatigue comme origine, d'où l'idée d'évaluer pour un fil prélevé, après un certain temps de service, ses facultés d'endurance en fonction du temps de service.

Si les résultats obtenus sont cohérents, il en résultera un moyen d'estimer à quel moment un câble a perdu ses propriétés d'endurance dans une mesure dangereuse.

2. Machine utilisée.

L'éprouvette d'essai (4) est maintenue à ses extrémités dans les mordaches (2).

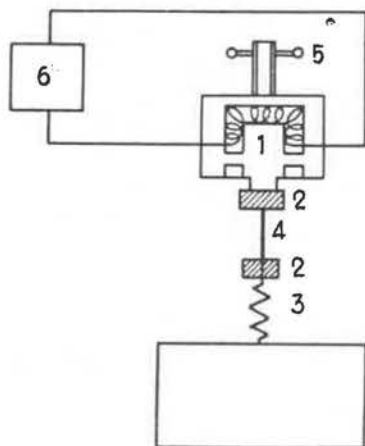


Fig. 1.

Un électro-aimant (1) alimenté par un générateur de tension du type électronique (6) à fréquence réglable, communique à l'éprouvette (4) des contraintes cycliques. On peut donner une tension statique initiale à l'éprouvette au moyen d'un ressort-vérin (5). Les mordaches inférieures sont reliées à un dynamomètre optique (3) qui permet de mesurer, au moyen d'un trait lumineux se déplaçant sur une échelle, la prétension et les charges max. et min.

Une cellule photo-électrique alimentée par le pinceau lumineux du dynamomètre maintient constant l'effort minimum.

La fréquence des vibrations peut être réglée dans certaines limites et se tient entre 50 et 100 oscillations par seconde pour les essais réalisés dans le cadre de cette étude.

Des dispositifs d'amarrage spéciaux sont prévus pour les fils, afin de répartir la pression des mordaches sur toute la surface de contact fil-mordache. Pour obtenir, lors de chaque essai, un serrage identique des mordaches, celui-ci se fait au moyen d'une clé dynamométrique.

Ce problème de fixation des fils est très important : si la fixation est défectueuse, le fil est blessé au droit de l'amarre et la rupture se produit dans celle-ci bien avant le nombre de cycles normal.

Une fixation correcte évite en grande partie ces ruptures et, même quand elles se produisent aux amarres, le fait d'avoir évité de blesser le fil donne un nombre de cycles à rupture normal.

Un compteur synchrone enregistre le nombre d'alternances effectuées jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

3. Avant-propos statistique.

En raison de la forte dispersion des résultats des essais de fatigue, il s'est avéré indispensable de faire usage du calcul statistique afin d'obtenir le maximum de renseignements utiles des résultats obtenus.

Avant de commencer un calcul statistique des résultats, il est cependant nécessaire d'éliminer toutes les erreurs systématiques, la statistique ne tenant compte que des erreurs accidentelles.

L'interprétation statistique des résultats conduit à :

3.1 Rechercher la valeur moyenne la plus probable (la plus représentative) d'une série de mesures.

Dans ce but, on envisage soit la moyenne arithmétique des résultats :

$$\bar{N} = \frac{\sum N}{n}$$

où N : résultat individuel
 n : nombre de résultats,

soit la valeur médiane M de la série de mesures (valeur telle que 50 % des résultats lui soient inférieurs et 50 % supérieurs).

Le choix de l'une ou l'autre de ces deux grandeurs sera discuté plus loin.

3.2 Donner une mesure précise de la dispersion des résultats.

L'écart type « σ » propre à une série de mesures est la grandeur la plus communément utilisée pour mesurer la dispersion d'une série de résultats.

L'écart type est égal à la racine carrée de la variance corrigée par un facteur b_n (dépendant du nombre d'essais).

$$\text{Variance} = S^2 = \frac{\sum (N - \bar{N})^2}{n - 1}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (N - \bar{N})^2}{n - 1}}$$

$$\text{Ecart type } \sigma = \frac{S}{b_n} \sqrt{\frac{n-1}{n}} = \frac{1}{b_n} \sqrt{\frac{\sum (N - \bar{N})^2}{n}}$$

où N : résultat individuel
 \bar{N} : moyenne arithmétique des résultats
 n : nombre de résultats
 b_n : facteur correctif dépendant du nombre d'essais.

Remarque : La différence entre S et σ diminue avec le nombre d'essais; celle-ci peut être considérée comme négligeable pour $n \geq 20$; pour $n = 20$ la différence étant égale à 1,4 %.

3.3 Donner les limites de confiance à attribuer à la moyenne (on dira par exemple, qu'il y a 95 chances sur 100 pour que l'intervalle défini par $\bar{N} \pm t_{(95,n)} S/\sqrt{n}$ contienne la valeur moyenne réelle de la série de résultats).

\bar{N} : moyenne arithmétique des résultats

$t_{(95,n)}$: facteur de « Student » ⁽¹⁾ dépend du nombre d'essais et du degré de certitude que l'on désire obtenir (à 80 %, à 95 %, à 99,9 %)

S : racine carrée de la variance

n : nombre d'éprouvettes.

3.4 Déterminer les limites de confiance sur les résultats individuels (par exemple on dira qu'on peut s'attendre en moyenne à obtenir 90 % des résultats dans l'intervalle défini par $\bar{N} \pm t_{(95,\infty)} \sigma$)

On appliquera deux méthodes différentes suivant que toutes les éprouvettes d'une série d'essais se seront rompues après un nombre de cycles fixé à l'avance ou qu'au contraire certaines auront résisté à ce nombre de cycles; dans ce dernier cas, certains résultats de la série d'essais restent indéterminés.

Dans le présent travail, on n'a pas visé à déterminer la limite de fatigue proprement dite des fils, mais les tensions pour lesquelles un fil donné peut résister à N répétitions d'efforts avant de se rompre.

A. Cas où toutes les éprouvettes se sont rompues.

On a remarqué expérimentalement qu'en envisageant les logarithmes des résultats (nombres de cycles à rupture) et la moyenne arithmétique des logarithmes, on obtenait une répartition plus symétrique des résultats autour de la moyenne des logarithmes que celle obtenue en considérant les nombres de cycles à rupture et leur moyenne arithmétique.

L'écart type n'ayant une signification que pour une répartition symétrique et normale ⁽²⁾ (résultats répartis suivant une loi bien déterminée (loi de Gauss) autour de la moyenne), on a jugé pré-

férable d'envisager dans tous nos calculs les logarithmes des résultats. La répartition de ceux-ci pour un nombre de cycles de l'ordre de 100 000 pourra être considérée comme obéissant à une loi normale.

On a donc procédé de la manière suivante pour chaque série de résultats d'essais de fatigue.

a) Calcul de la moyenne arithmétique des loga-

$$\text{rithmes } \sum \frac{\log N}{n} = \overline{\log N'}$$

⁽¹⁾ Il existe des tables des valeurs du facteur de Student dans tous les livres de statistique. (Cfr. *Introduction to modern statistical methods*, by P.R. Rider).

⁽²⁾ La répartition gaussienne ou normale des résultats est une répartition symétrique autour de la moyenne et obéissant à la loi : la probabilité d'un écart donné entre un résultat individuel et la moyenne des résultats est d'autant plus petite que cet écart est grand en valeur absolue (diagramme A - fig. 2).

b) Calcul de l'écart type sur les logarithmes

$$\sigma = \frac{1}{b_n} \sqrt{\frac{\sum (\log N - \overline{\log N'})^2}{n}}$$

c) Détermination des limites de confiance à 95 % sur la moyenne arithmétique

$$\overline{\log N'} \pm t_{(95,n)} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$(S = \sqrt{\frac{\sum (\log N - \overline{\log N'})^2}{n-1}})$$

B Cas où toutes les éprouvettes ne se sont pas rompues après un nombre de cycles fixé à l'avance.

Certains résultats de la série d'essais étant indéterminés, les calculs de la moyenne arithmétique des résultats et de l'écart type, comme dans le premier cas, ne sont plus possibles. Pour obtenir une valeur de la tendance centrale de la série de résultats et de sa dispersion, on procèdera selon le procédé graphique suivant :

a) on établira le tableau suivant en partant de la plus petite valeur N,

N° d'ordre	Nombre de cycles à rupture : N	Log. N	N° d'ordre divisé par n + 1
1	N ₁	log N ₁	1/n + 1
2	N ₂	log N ₂	2/n + 1
—	—	—	—
—	—	—	—
—	—	—	—
—	—	—	—
i	N _i	log N _i	i/n + 1
—	—	—	—
—	—	—	—
n - 3	N _n - 3	log (N _n - 3)	n - 3/n + 1
n - 2	N _n - 2	log (N _n - 2)	n - 2/n + 1
n - 1	indéterminé	indéterminé	n - 1/n + 1
n	indéterminé	indéterminé	n/n + 1

b) on porte les résultats des colonnes 3 et 4 sur un diagramme gaucho-métrique ⁽³⁾ (diagramme B - fig. 3). L'utilisation de ce diagramme nous permet de voir si en bonne approximation on a affaire à une répartition normale des résultats; en effet, dans ce cas, en portant en ordonnée les résultats obtenus et, en abscisse, le nu-

⁽³⁾ Le diagramme gaucho-métrique porte l'échelle des abscisses étalonnée suivant la loi de Gauss et l'échelle métrique pour les ordonnées.

DIAGRAMME A

Exemple de courbe gaussienne ou normale

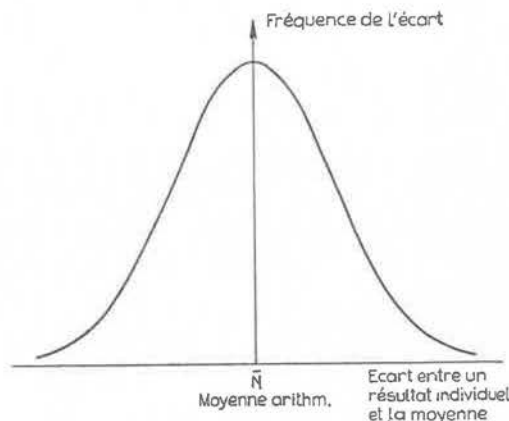


Fig. 2.

méro d'ordre du résultat divisé par n + 1 exprimé en %, les points se rangent approximativement sur une droite.

c) La droite une fois tracée, il est possible de tirer de ce diagramme une estimation graphique de la médiane des log des résultats : M'; cette valeur médiane étant déterminée par l'intersec-

tion de la droite obtenue avec la parallèle à l'axe des ordonnées passant par le point d'abscisse 50 %, (en effet, par définition, la médiane d'une série de mesures est une valeur telle que 50 % des résultats lui sont inférieurs et 50 % supérieurs) (diagramme B - fig. 3).

d) Estimation graphique de l'écart type σ.

Les propriétés du diagramme gaucho-métrique sont telles que l'écart type σ peut être obtenu en faisant la différence des ordonnées des points d'ab-

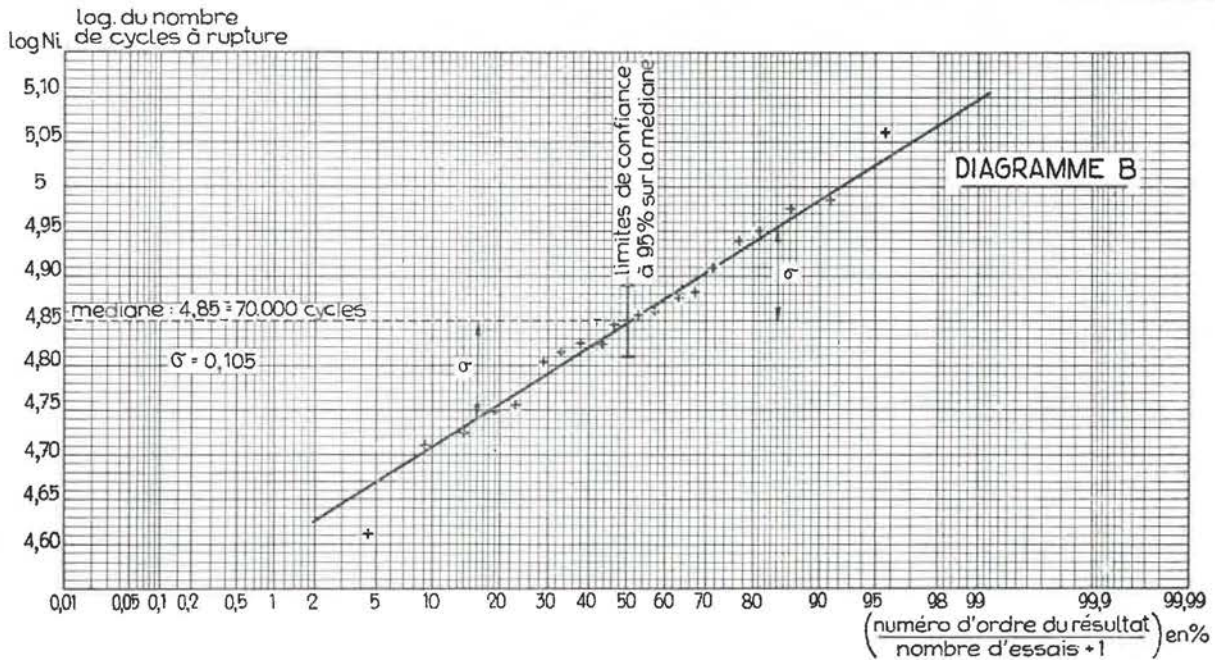


Fig. 3.

scisse 50 % et 84 % (ou 16 %) (diagramme B - fig. 3).

e) Possédant la valeur médiane de la série de mesures et une estimation de σ , il est possible de déterminer un intervalle de confiance sur la médiane M' au moyen de la formule

$$M' \pm t_{(90, \infty)} (\sigma / \sqrt{n}) 1,25$$

f) Il est aussi possible de déterminer le log du nombre de cycles ($\log N$) en deçà duquel on peut s'attendre en moyenne à trouver un certain pourcentage d'éprouvettes rompues.

Remarque : Cette méthode peut évidemment être utilisée dans le cas où toutes les éprouvettes sont rompues; elle présente l'avantage d'être plus rapide que la méthode 1, mais les résultats obtenus sont un peu moins précis.

g) Le diagramme illustre clairement qu'il est indifférent de posséder ou non la valeur numérique des quelques derniers résultats.

Ci-après, un exemple d'une série de 20 fils où il y a eu rupture pour tous les fils.

Le tableau 1 nous donne les résultats obtenus par calcul. Le diagramme B (fig. 3). donne les résultats obtenus graphiquement. Comme on peut le constater, les résultats obtenus graphiquement concordent très bien avec ceux obtenus par calcul. Dans le cas où certains résultats manquent (par suite d'éprouvettes non rompues), la méthode graphique s'impose en raison de l'impossibilité de calculer la moyenne arithmétique des résultats.

Exemple ci-joint :

Calcul	Graphique
Moyenne : 69.820	70.000
σ : 0,102	0,105

Tableau 1
FICHE STATISTIQUE
Essais de fatigue sur fils — Vibrophore.

N° de l'essai	Nombre de cycles $\times 100 = N$	$\log N$	Ecart entre les résultats et la moyenne arithmétique	Carré de l'écart	N° d'ordre pour la représentation graphique
1	67	4,8261	0,0178	0,0003	9
2	69	4,8388	0,0051	0,0000	10
3	86	4,9345	0,0906	0,0082	16
4	66	4,8195	0,0244	0,0006	8
5	93	4,9685	0,1246	0,0155	18
6	103	5,0128	0,1689	0,0285	20
7	88	4,9445	0,1006	0,0101	17
8	76	4,8808	0,0369	0,0014	14
9	53	4,7243	0,1196	0,0143	3
10	51	4,7076	0,1363	0,0186	2
11	57	4,7560	0,0879	0,0077	5
12	65	4,8129	0,0310	0,0010	7
13	56	4,7482	0,0957	0,0092	4
14	41	4,6128	0,2311	0,0534	1
15	64	4,8062	0,0377	0,0014	6
16	72	4,8573	0,0134	0,0002	11
17	72	4,8573	0,0134	0,0002	12
18	82	4,9138	0,0699	0,0049	15
19	75	4,8751	0,0312	0,0010	13
20	96	4,9823	0,1384	0,0192	19
$\Sigma \log =$		96,8793		0,1957	

$$\Sigma \frac{\log}{n} = 4,8439 = \overline{\log N'}$$

$$\overline{N'} = 69,820 \text{ cycles}$$

$$\sigma = \frac{1}{b_{20}} \sqrt{\frac{0,1957}{20}} = 0,102$$

$$\frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0,021$$

Limites de confiance à 95 % sur $\overline{N'}$ de 63.500 à 77.000 cycles.

4. Résultats obtenus lors des essais préliminaires.

4.1 Essais sur 25 fils neufs galvanisés de 2 mm de diamètre et de résistance unitaire égale à 195 kg/mm².

Les fils sont redressés par traction jusqu'au voisinage de leur limite élastique, ensuite ils sont écrouis sur les parties enserrées dans les mordaches afin d'éviter les ruptures aux amarres. Dans ces conditions et jusqu'à nouvel ordre, on ne prendra en considération que les ruptures trouvées hors de ces parties écrouies.

Les tensions d'essais maximum et minimum sont respectivement de 102 kg/mm² et de 25,5 kg/mm².

La moyenne arithmétique des logarithmes des nombres de cycles à rupture est $\overline{N'} = 137.000$.

L'écart type sur les log : $\sigma = 0,181$.

En faisant la distinction entre les ruptures en pleine éprouvette et les ruptures aux amarres, on obtient les résultats suivants :

	$\overline{N'}$	$\overline{\log N'}$	σ	n
ruptures aux amarres :	140.000	5,14613	0,21	13
ruptures en pleine éprouvette :	128.000	5,10721	0,175	12

Conclusions.

Si l'on s'attache à ces deux derniers résultats, le critère de Snedecor (test F) montre que les différences des σ sont absolument normales; en effet

$$F = S^2 \text{ max} / S^2 \text{ min} = 1,4.$$

D'autre part en faisant l'hypothèse de nullité, on peut vérifier que les différences obtenues sur les moyennes sont dues au hasard. Pour cela, on peut calculer le σ de l'ensemble des deux populations au moyen de la formule :

$$\sigma^2 = \frac{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

où n_1 = nombre de fils dans l'essai (1)

σ_1 = écart type de (1)

n_2 = nombre de fils dans l'essai (2)

σ_2 = écart type de (2)

on trouve un $\sigma = 0,20$.

L'écart type sur la différence des moyennes vaut : $\sigma_{\text{diff.}} = 0,09$.

La différence entre les moyennes vaut :

$$\overline{\log N'_1} - \overline{\log N'_2} = 0,03892$$

est petit par rapport à cet écart type; dès lors, cette différence n'est pas significative.

On peut en conclure que les ruptures en pleine éprouvette et les ruptures aux amarres ne donnent pas de différences significatives quant à leurs moyennes arithmétiques et écarts types, tout au moins sur des séries comptant au maximum 13 éprouvettes et dans les limites de précision acceptables dans cette étude. Dès lors, on ne fera plus la distinction entre les deux types de rupture. A noter d'ailleurs que l'on est parvenu, par la suite, à éliminer presque complètement les ruptures aux amarres.

4.2 Essais sur 19 fils neufs en acier clair.

Diamètre : 2,85 mm.

Résistance unitaire : 190 kg/mm².

Limites des tensions :

limite supérieure : 112,5 kg/mm²,

limite inférieure : 55,5 kg/mm².

2 éprouvettes ne se sont pas rompues après un nombre de cycles supérieur à 10⁶.

On trouve une valeur médiane du nombre de cycles : 112 000 et un écart type $\sigma = 0,416$.

Remarque : Les fils galvanisés dont il sera question dans cette étude seront toujours des fils poligalvanisés.

4.3 Dans ces deux séries d'essais, on constate une dispersion importante des résultats dont les causes ont dû être étudiées comme suit :

La dispersion des résultats dépend de divers facteurs dont les principaux sont les suivants :

- 1) dispersion due à l'hétérogénéité des fils;
- 2) dispersion provenant du dérèglement des charges d'essais pendant la durée de l'essai;
- 3) dispersion propre à l'opérateur;
- 4) dispersion provenant du dressage imparfait des fils;
- 5) dispersion due au serrage des amarres;
- 6) dispersion due à l'imprécision de lecture des charges max. et min. supportées par les fils.

Les mesures suivantes ont été prises afin de réduire cette dispersion.

- 1) Dressage soigné des fils.
- 2) Encastrement des extrémités des fils entre 2 lamelles de cuivre d'épaisseur calibrée corres-

pendant à chaque diamètre de fils, ceci afin d'éviter les ruptures aux amarres.

- 3) Amarrage parfait des fils dans les mâchoires, éviter les oscillations latérales de celles-ci, ce qui introduirait un effet de flexion supplémentaire dans le fil.
- 4) Réglage continu de la charge pendant les essais effectué au moyen d'un mainteneur de charges manuel, appareil destiné à corriger à tout moment les contraintes exercées sur les éprouvettes.

Selon le constructeur, en se conformant rigoureusement à ces recommandations, la dispersion des résultats ne provient plus en majeure partie que de l'hétérogénéité des lots de fils, c'est-à-dire blessures superficielles, structures différentes, etc.

Il est cependant à remarquer que, pour des fils à haute résistance, l'influence de l'état de surface prend une importance particulièrement grande dans les essais de fatigue; il en résulte que la dispersion des résultats due à l'état des fils eux-mêmes sera importante.

4.4 D'autre part, on s'est posé la question de la constance des efforts sur les fils.

Un relevé photographique des amplitudes des forces au début d'un essai et après 45 minutes (fig.

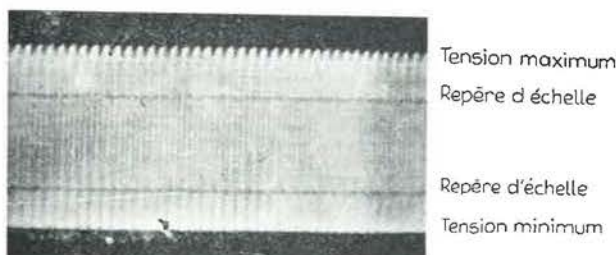


Fig. 4.

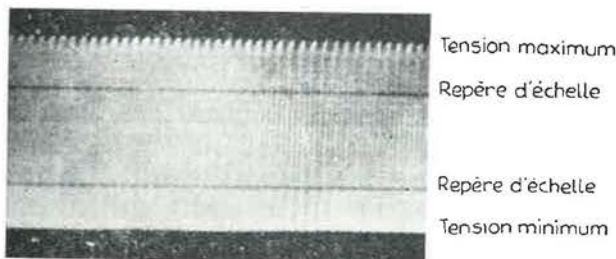


Fig. 5.

4 et 5) a montré une parfaite constance des efforts au cours des essais, le mainteneur de charge étant en service.

On voit en effet sur la photo apparaître la sinusoïde décrivant les efforts exercés sur le fil; cette sinusoïde est très resserrée dans le temps vu la fréquence élevée des pulsations, mais on observe

que les sommets des sinusoïdes restent à un niveau de tension parfaitement constant dans le temps.

On a parfois constaté qu'un réglage défectueux de la machine pouvait amener des fluctuations lentes dans ces niveaux de tensions.

Si l'on prend donc les précautions d'usage, on peut être assuré que les tensions imposées restent constantes pendant la durée de l'essai. Reste comme facteur de dispersion, l'imprécision relative à la lecture de l'échelle.

4.5 En effet, avec le dynamomètre de 400 kg en faisant les lectures au 1/2 mm, on peut apprécier une différence de charge de 2 kg. Avec le dynamomètre de 2 tonnes, dans les mêmes conditions, on peut apprécier une différence de charge de 10 kg seulement.

Afin de faire une lecture plus précise des contraintes maxima et minima supportées par les fils, on a placé un microscope pouvant se déplacer parallèlement à l'échelle graduée du vibrophore. L'objectif de ce microscope étant gradué, il était possible de lire les tensions à 1/20^{me} de graduation de l'échelle du vibrophore (à 0,2 kg près pour le dynamomètre de 400 kg et à 1 kg près pour le dynamomètre de 2 tonnes).

On a fait des essais portant sur 46 fils en utilisant le microscope et sur 20 fils sans microscope, tous les fils provenant d'un même lot.

Les résultats ont été les suivants :

sans microscope	avec microscope
\bar{N} : 45.460 cycles	45.420 cycles
σ : 0,0923	0,0971

On ne constate aucune différence significative dans la valeur moyenne du nombre de cycles ou dans la dispersion des résultats. On peut donc affirmer que la dispersion des résultats due à l'imprécision des lectures des contraintes maxima et minima supportées par les fils rentre pour une faible part dans la dispersion totale observée qui représente donc de façon convenable l'hétérogénéité du fil.

4.6 Conclusions.

Le facteur 2) a été réduit par la mise en service du mainteneur de charges.

Les facteurs 3) et 6) ont pu être réduits avec l'entraînement de l'opérateur et l'éventuelle utilisation du microscope.

Le facteur 4) a pu également être réduit par l'étirement des fils dans une machine de traction, au voisinage de leur limite élastique. Quant au facteur 5), l'utilisation de la clé dynamométrique annule dans une large mesure la dispersion due à un serrage irrégulier des mordaches.

Le constructeur de la machine considère qu'en se conformant aux mesures signalées ci-dessus, des essais effectués sur des séries de 20 éprouvettes doivent être suffisants pour arriver à une précision acceptable.

5. Essais effectués avec mainteneur de charges sur des fils usagés et sur des fils neufs.

A la suite d'essais effectués sur 13 groupes de 20 fils usagés et neufs, on constate que :

- 1) la dispersion des résultats est nettement plus forte pour les fils usagés que pour les fils neufs.
- 2) une comparaison faite entre des fils neufs et des fils usagés de 2 mm de diamètre et de résistance unitaire égale à 190 kg/mm² — les tensions max. et min. étant les mêmes — donne les résultats suivants :

Fils usagés : $M' = 116\ 000$ $\sigma = 0,30$

Fils neufs : $\bar{N}' = 165\ 000$ $\sigma = 0,176$

En considérant les écarts types de ces deux séries, on constate la grande dispersion qui règne dans les essais sur fils usagés et qui traduit d'ailleurs très bien les dégradations de surface.

On constate aussi que les fils usagés donnent une moyenne plus faible que les fils neufs comme il fallait s'y attendre.

A la suite de ces essais, il est apparu que la dispersion des résultats des essais sur fils usagés rend indispensable un nombre élevé d'essais afin de pouvoir déduire une valeur moyenne du nombre de cycles à rupture avec une précision acceptable. Dans ces conditions, il a fallu renoncer à prévoir des essais sur fils usagés, car il devenait impossible de prélever sur un câble en service un nombre suffisant de fils, par exemple 25 fils, sans altérer outre mesure la résistance de celui-ci. C'est le seul obstacle qui empêche les essais au vibrophore

d'être utilisés pour suivre l'évolution du fil quant à sa résistance à la fatigue en fonction de son temps de service.

6. Modification de la recherche.

Il a donc fallu abandonner une partie du but initial de cette recherche, partie qui tendait à mesurer les propriétés d'un fil en fonction de son temps de service.

Il est apparu d'autre part que les résultats obtenus à ce moment étaient très encourageants en ce qui concerne la poursuite d'une étude axée sur les fils neufs pour lesquels il est facile de prélever un grand nombre d'échantillons.

L'essai de fatigue est précieux en ce sens qu'il reproduit un type de sollicitation qui se produit réellement au cours de la vie d'un câble. Cet essai comble donc une lacune dans les essais de routine actuels.

L'essai de fatigue est encore précieux en ce sens qu'on le considère unanimement comme le seul essai capable de dépister dans toute la masse de l'éprouvette le point le plus faible.

C'est donc un essai à portée microscopique, appliqué à un volume de matière important et fournissant un jugement sous forme de nombres contrairement aux examens métallographiques.

Dans ces conditions, c'eût été dommage de ne point exploiter ces avantages et il fut décidé de reporter l'étude sur les fils neufs.

On s'est donc proposé de rechercher comment les essais de fatigue sur fils neufs pourraient servir de critère de qualité du fil.

7. Essais effectués sur fils neufs exclusivement.

7.1 Essai I.

Onze séries d'essais ont été faites sur des fils clairs et galvanisés de résistances unitaires diver-

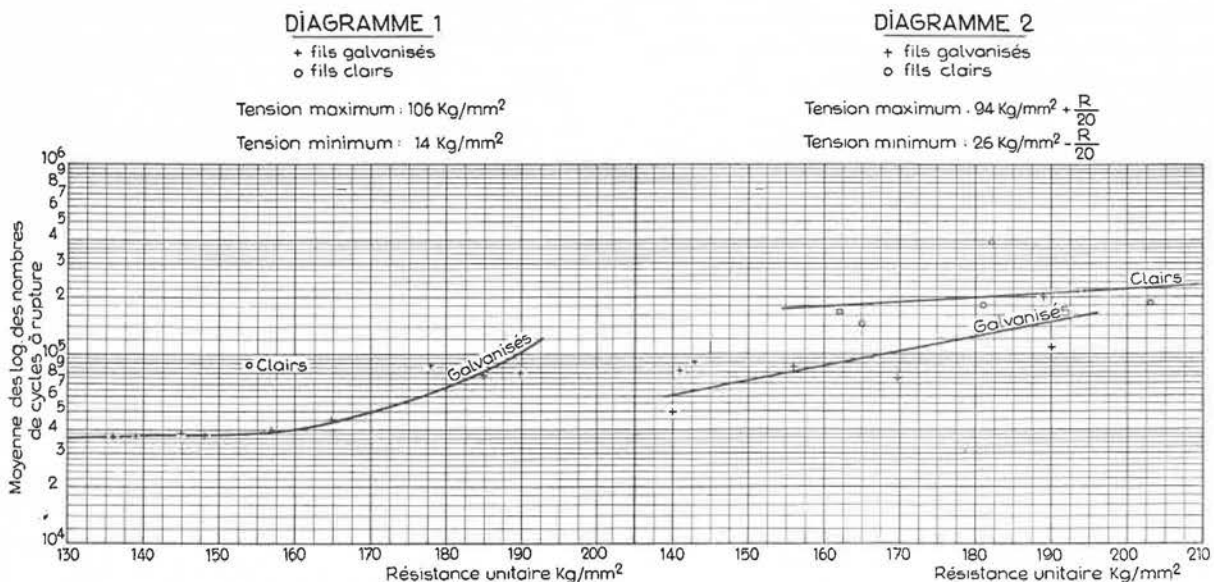


Fig. 6.

ses, de diamètres voisins de 2 mm. Les limites de tensions étant respectivement égales à 14 kg/mm² et 106 kg/mm² pour tous les essais.

En comparant les résultats obtenus pour ces 11 séries et en portant en graphique le nombre moyen de cycles à rupture pour chaque série, en fonction de la résistance unitaire des fils, on trouve que la résistance à la fatigue des fils augmente, dans une faible mesure, avec la résistance unitaire de ceux-ci (diagramme 1 - fig. 6).

7.2 De cette constatation, est venue l'idée de chercher quelle relation pourrait exister entre la résistance unitaire et la durée d'un fil.

A cet effet, une seconde série d'essais a été entreprise et il en sera question plus loin.

7.3 Les résultats fournis par les fils clairs et galvanisés apparaissent fort différents. On a donc décidé pour la suite de séparer les résultats obtenus sur fils clairs et sur fils galvanisés et d'étudier séparément ces deux espèces.

La dispersion des résultats a diminué sensiblement comparativement aux essais antérieurs; ceci est dû aux précautions signalées plus haut qui ont été respectées et en partie aussi au choix des contraintes max. et min., celles-ci donnant lieu à un nombre de cycles à rupture beaucoup plus faible que précédemment, ce qui fait diminuer la dispersion.

Il est à remarquer que la dispersion des deux séries de fils clairs est supérieure à celle des fils galvanisés, comme déjà constaté précédemment.

7.4 Essais II.

Partant de la constatation ci-dessus que la durée d'un fil ne dépendait que peu de sa résistance unitaire, on a entrepris une série d'essais avec fils de résistances unitaires différentes et en sollicitant ces fils suivant une fonction croissante de la résistance unitaire, l'idée étant la suivante : *sous quelles tensions faut-il solliciter des fils de résistances différentes pour qu'ils montrent la même durée ?*

A cet effet, au lieu de garder fixes les tensions d'essais maxima et minima, on a étendu l'écart entre ces tensions en fonction directe de la résistance unitaire du fil et on a choisi arbitrairement d'augmenter cet écart proportionnellement à 1/20 de cette résistance unitaire.

Les résultats obtenus de cette façon sont repris au diagramme 2 (fig. 6).

Ces essais ont donc été effectués avec des limites de tension respectivement égales à $94 + R/20$ et $26 - R/20$.

En considérant le diagramme 2 (fig. 6), une première constatation s'impose : la différence des résultats fournis, d'une part, par les fils clairs et,

d'autre part, par les fils galvanisés, qui était d'ailleurs apparue précédemment.

Les fils clairs ont une résistance à la fatigue nettement plus élevée. Concernant les fils galvanisés, le nombre de cycles à rupture est encore une fonction croissante de la résistance unitaire, mais moins cependant que dans les conditions de sollicitation indépendante de la résistance.

En cours d'essais, on a remarqué que le nombre de ruptures aux amarres est beaucoup plus élevé pour les fils clairs que pour les fils galvanisés; ceci est vraisemblablement dû au fait que ces derniers ont un revêtement protecteur de zinc qui les protège dans les amarres.

8. Choix d'une orientation pour les essais ultérieurs.

Comme le montrent les diagrammes précédents, il apparaît que l'augmentation des tensions dans la proportion de $R/20$ n'a pas sensiblement changé le rapport existant entre la charge de rupture et la durée.

Si l'on pouvait trouver une formule en R/K (K à déterminer) telle que la durée observée ne dépende plus de la résistance unitaire R , on obtiendrait un critère facile et unique de qualité des fils, critère consistant à dire : sollicité entre $26 - R/K$ et $94 + R/K$, un fil d'acier dur ne doit pas rompre en moyenne à l'essai de fatigue avant N cycles (N à préciser).

L'intérêt pratique d'un tel critère apparaît immédiatement; on a donc dirigé les essais dans ce sens et appliqué, après quelques tâtonnements, des limites de tensions respectivement égales à :

$$\boxed{94 + R/9 \text{ et } 26 - R/9} \quad \text{kg/mm}^2.$$

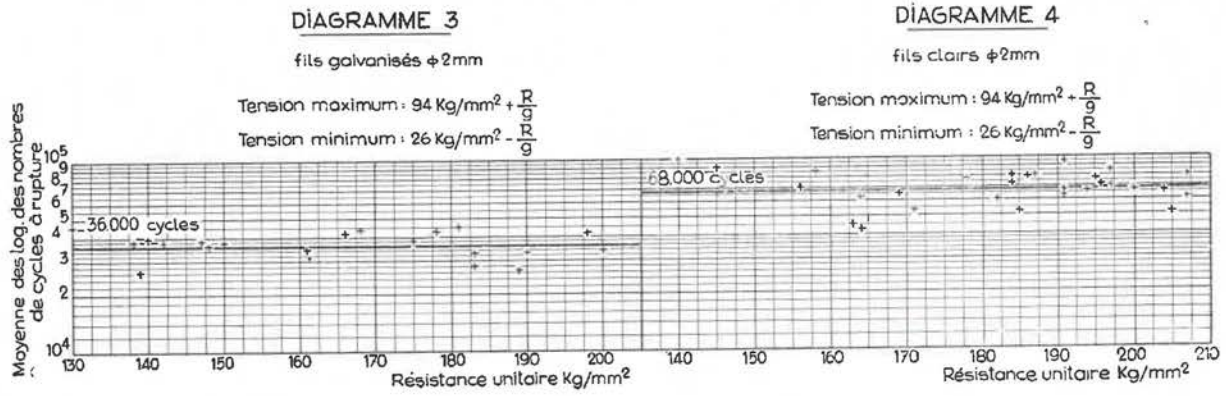
Les essais suivants ont également été faits avec le maximum de soin : réglage constant des contraintes pendant les essais, amarrage correct des fils, etc..., les essais ont porté sur fils de 2 mm et sur fils de 3 mm, car on a supposé que le nombre de cycles à rupture est influencé par le diamètre du fil.

9. Essais réalisés entre les limites de tensions $94 + R/9$ et $26 - R/9$.

9.1 Fils galvanisés de 2 mm de diamètre.

24 séries de 20 fils, de résistances unitaires diverses, ont été soumises à l'essai de fatigue entre les limites de tensions signalées ci-dessus.

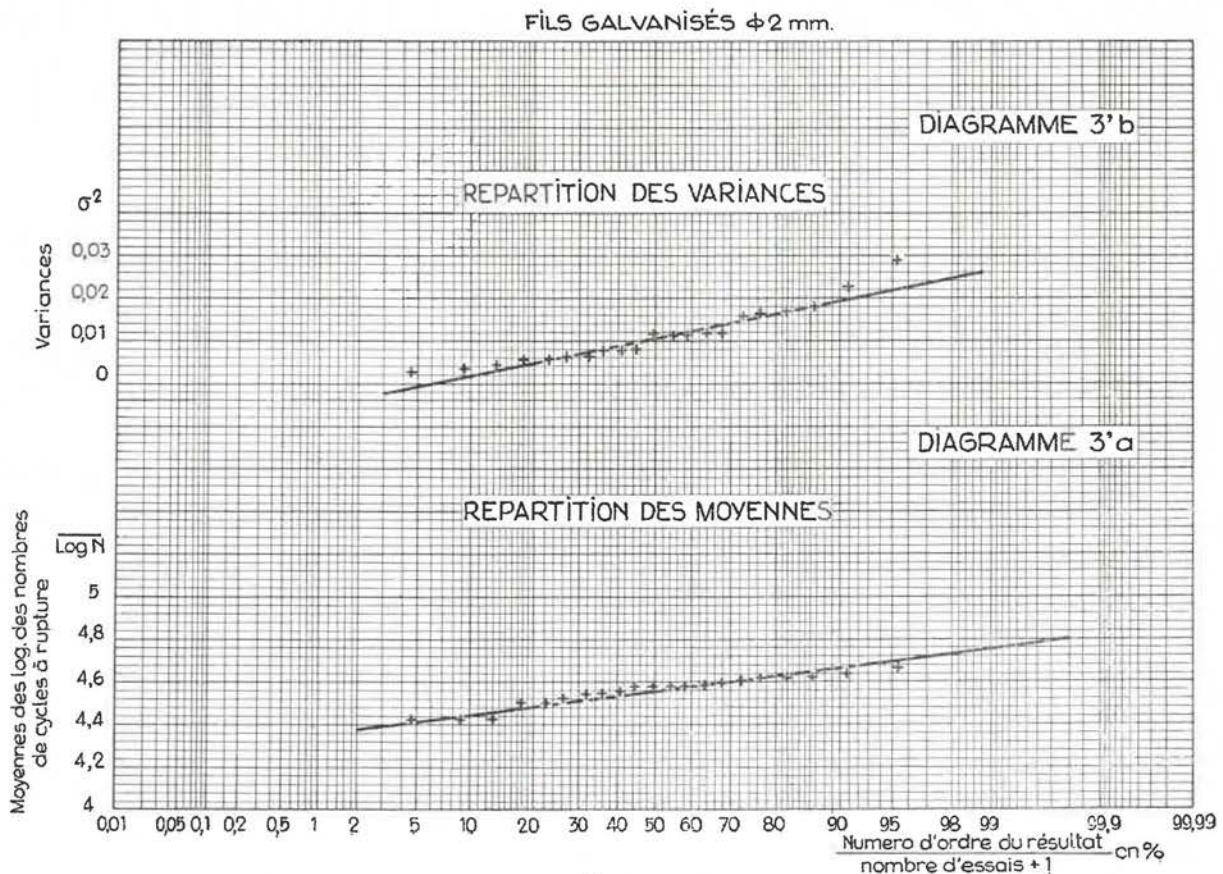
Sur le diagramme 3 (fig. 7), nous avons porté les moyennes logarithmiques de chaque série de 20 fils ($\Sigma \log N/20$) en fonction de la résistance unitaire des fils.



Nous voyons que ces divers résultats se groupent approximativement suivant une horizontale; autrement dit : le nombre moyen de cycles à rupture semble indépendant de la résistance des fils, dans les conditions d'essais définies plus haut.

A la suite de cette constatation, il devenait légitime de supposer que toutes ces séries appartenaient à une même population de fils, chose qui n'était pas évidente a priori vu les différentes provenances et résistances des fils essayés. Pour vérifier le bien fondé de cette hypothèse, nous avons placé les diverses moyennes sur un diagramme gaussio-métrique (diagramme 3'a, fig 8) et avons observé qu'elles se mettent sur une droite, ce qui signifie que leur répartition répond à une loi nor-

naient à une même population de fils, chose qui n'était pas évidente a priori vu les différentes provenances et résistances des fils essayés. Pour vérifier le bien fondé de cette hypothèse, nous avons placé les diverses moyennes sur un diagramme gaussio-métrique (diagramme 3'a, fig 8) et avons observé qu'elles se mettent sur une droite, ce qui signifie que leur répartition répond à une loi nor-



male. Ce résultat n'a d'ailleurs été obtenu qu'après suppression de trois séries d'essais qui, déjà à vue d'œil, avaient donné des résultats nettement en dehors des limites couramment observées.

Cette constatation nous permet de considérer les moyennes des différentes séries d'essais comme répondant à une répartition normale et, dès lors, de procéder à tous les calculs d'usage dont les conséquences seront développées plus loin.

On pouvait se demander si cette normalité des moyennes n'était pas simplement le résultat d'une normalité de l'ensemble des résultats d'essais individuels (nombres de cycles à rupture de chaque fil).

Pour vérifier la normalité de l'ensemble des résultats (420 fils), nous avons appliqué le X^2 test qui nous a donné un résultat tout à fait satisfaisant ($X^2 = 6,3$ pour $n = 7$).

En conséquence, on admettra, pour les essais futurs, que la répartition des résultats d'essais de fatigue, dans les conditions d'essais stipulées ci-dessus, est *logarithmico-normale*; il est donc possible de déduire les résultats suivants pour les fils galvanisés de 2 mm de diamètre.

- 1) 50 % des fils résistent à un nombre de cycles égal à 36 000, 36 000 cycles étant la moyenne log. des nombres de cycles à rupture des 420 fils envisagés, soit $\approx \log N/420$.
- 2) La meilleure estimation de l'écart type de la population est donnée par la formule :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i \sigma_i^2}{n - k}} = 0,1050$$

où n_i : nombre de fils dans la série i
 σ_i : écart type de la série i
 n : nombre total d'essais
 k : nombre de séries.

- 3) La moyenne log. aura 95 % de chance de se trouver dans l'intervalle $\bar{N} \pm t_{(95,420)} \sigma / \sqrt{n}$, soit entre 35 130 cycles et 36 800 cycles.
- 4) 95 % des résultats individuels se trouveront dans une zone s'étendant de 22 180 cycles à 58 320 cycles ($\bar{N} \pm t_{(95,\infty)} \sigma$).

9.2 Il est donc possible dès à présent, après avoir soumis une série quelconque de fils de 2 mm, galvanisés, aux essais de fatigue, de dire si les résultats obtenus sont plus élevés ou moins bons que la moyenne normalement attendue. Par exemple, si la moyenne des essais de cette série s'élève à 40 000 cycles, les fils pourront être qualifiés d'exceptionnellement bons.

Après avoir tiré diverses conclusions concernant les moyennes des séries d'essais, il est intéressant, à présent, d'étudier la dispersion de celles-ci; en

effet, la dispersion des résultats d'une série d'essais est une mesure de l'homogénéité du lot de fils essayés et, par la même, constitue un facteur de qualité de toute première importance.

La variance étant la mesure de la dispersion des essais la plus convenable à utiliser pour ce but, on a porté sur le diagramme gaussométrique 3'b (fig. 8) les variances des séries de 20 fils. Comme on pouvait s'y attendre en raison de la normalité de la population, les points représentatifs se répartissent selon une droite; il est possible de déduire de ce diagramme une valeur moyenne de la variance égale à 0,01.

On pourrait donc, sans aller plus loin, considérer une série dont la variance (dispersion) serait de 0,001, comme exceptionnellement homogène.

Les propriétés ci-dessus concernant la moyenne et la variance sont de toute première importance pour déterminer un système d'acceptation ou de refus des fils sur la base d'essais de fatigue. Il est en effet à remarquer que de nombreuses ruptures de fils en service ont la fatigue comme origine et que, d'une façon générale, celle-ci joue un rôle non négligeable dans le processus de dégradation des câbles; il en résulte que la résistance à la fatigue des fils de câbles constitue un *facteur essentiel* pour juger de la qualité de ceux-ci et que les essais de fatigue reflètent une réalité et non pas une propriété théorique discutable.

9.3 A la base de tout système d'acceptation ou de refus des lots de fils, il faut se fixer :

- 1) le nombre de fils à soumettre à l'essai de fatigue;
- 2) des limites de tolérance pour la moyenne de la série;
- 3) la dispersion maximum admise, mesurée à l'aide de la variance ou de l'écart type.

Il suffit de se donner une limite inférieure d'acceptation pour la moyenne : une trop grande résistance à la fatigue ne pourrait nuire, en aucune sorte, à la bonne tenue du câble; de même il suffit de donner une limite supérieure pour la variance, c'est-à-dire pour l'hétérogénéité du lot de fils.

Prenant comme base les résultats acquis au cours des essais ci-dessus, on constate, d'après le diagramme 3'a (fig. 8), que 95 % des moyennes des séries de 20 fils sont supérieures à 26 000 cycles et que, d'autre part, 95 % des variances sont inférieures à 0,021 (diagramme 3'b, fig. 8).

On peut donc raisonnablement proposer pour limite d'acceptation les deux conditions suivantes :

- 1) $\bar{N} \geq 26\ 000$ cycles
- 2) $\sigma^2 \leq 0,021$.

Néanmoins, il semble préférable de prévoir une zone de tolérance et d'adopter les limites légèrement modifiées suivantes :

Conditions d'acceptation :

- 1) $\bar{N}^2 \geq 26\ 000$ $\sigma^2 \leq 0,021$
- 2) $\bar{N}^2 \geq 26\ 000 - 10\ %$ $\sigma^2 \leq 0,021$
- 3) $\bar{N}^2 \geq 26\ 000$ $\sigma^2 \leq 0,021 + 10\ %$

Une des trois conditions doit être réalisée.

Ces conditions sont un peu moins sévères que les précédentes et permettent une plus grande souplesse dans l'acceptation ou le refus d'un lot de fils.

En effet, une moyenne légèrement inférieure est tolérée si la dispersion ne dépasse pas la limite admise et, inversement, une dispersion un peu trop élevée est acceptable si la moyenne des résultats est suffisante.

Les conditions imposées d'une part à la moyenne et d'autre part à la variance s'avèrent nécessaires pour obtenir un lot de fils dont la résistance à la fatigue est suffisante et dont on peut être assuré que l'hétérogénéité n'excède pas certaines limites admissibles.

Les résultats obtenus jusqu'à présent sont tous basés sur des séries de 20 fils, néanmoins, il semble que des séries de 12 fils donneront, pour les

essais de routine, des résultats d'une précision acceptable en réduisant sensiblement le temps des essais. En raison de la dispersion des résultats, un nombre d'essais inférieur à 10 serait nettement insuffisant.

9.4 Essais sur fils clairs de 2 et 3 mm de diamètre.

Les résultats portent sur 29 séries de fils clairs de 2 mm de diamètre.

Sur le diagramme 4 (fig. 7), on a porté les moyennes des log. des nombres de cycles à rupture des 29 séries de fils en fonction de leurs résistances unitaires respectives.

On peut tirer de ce diagramme les remarques suivantes :

1) L'état de sollicitation défini par les tensions limites : $94 + R/9$ et $26 - R/9$ conduit, pour les fils clairs de 2 mm de \varnothing environ, à une durée de vie sensiblement indépendante de la résistance unitaire du métal (dans les limites expérimentées de 140 à 220 kg/mm²) ;

2) Comme dans le cas des fils galvanisés de 2 mm de diamètre, l'ensemble des résultats des essais de fatigue portant sur 580 fils clairs, constitue une population logarithmico-normale (le χ^2 test donnant le résultat suivant :

$$\chi^2 = 7,9 \text{ pour } n = 7);$$

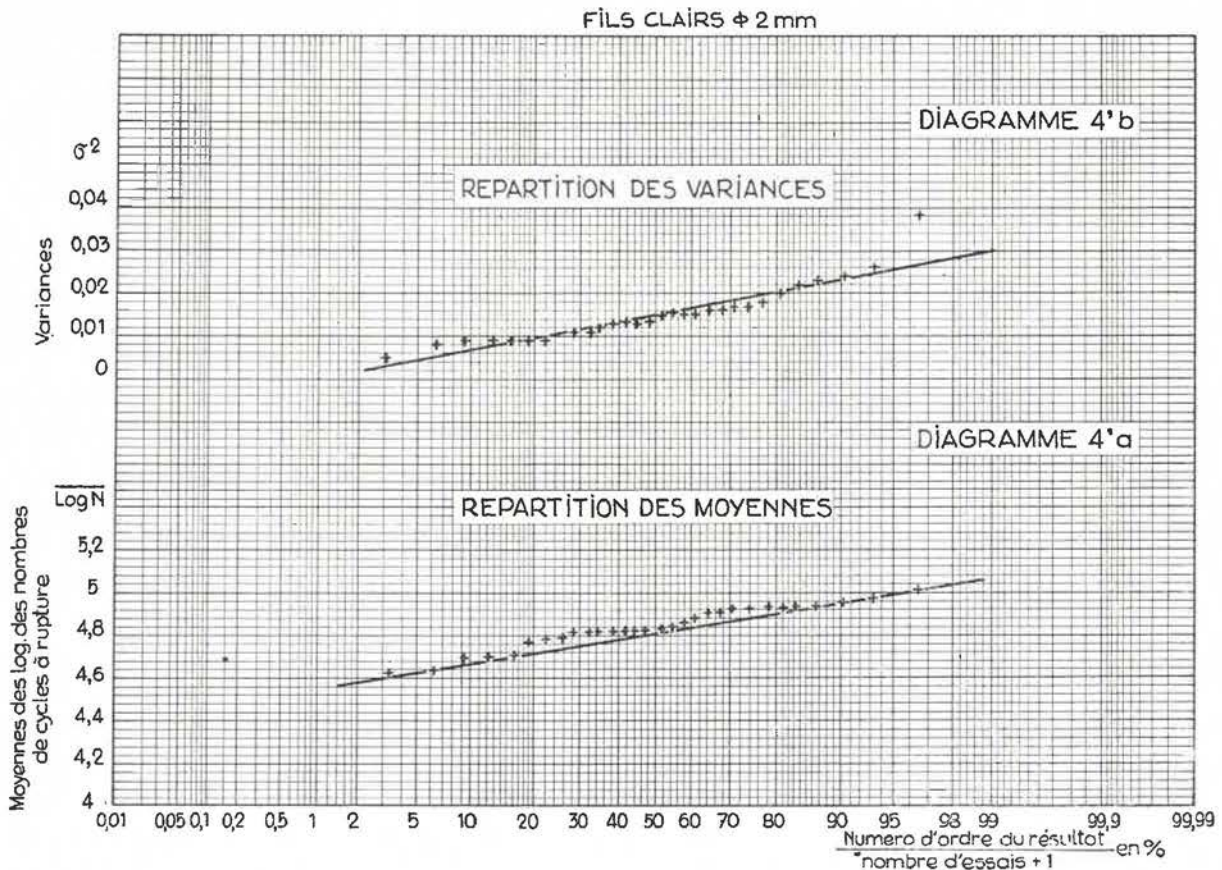


Fig. 9.

3) Les répartitions des moyennes et des variances sont normales (diagramme 4'a et 4'b; fig. 9);

4) La moyenne des log. des nombres de cycles à rupture des 580 fils est égale à 68 350 cycles;

5) L'écart type σ vaut 0,1260;

6) Il y a 95 % de chance pour que la moyenne de la population constituée par les résultats des essais sur fils de 2 mm clairs soit comprise entre 66 760 et 70 000 cycles ($\bar{N}' \pm t_{(95,600)} \sigma / \sqrt{n}$);

7) 95 % des résultats individuels se trouvent compris entre 38 260 et 122 000 ($\bar{N}' \pm t_{(95,\infty)} \sigma$).

On s'est rapidement aperçu que les fils clairs offraient une résistance à la fatigue nettement supérieure à celle des fils galvanisés.

En conséquence, il faut donc appliquer aux fils clairs des critères de qualité différents de ceux des fils galvanisés.

On a établi les conditions d'acceptabilité suivantes sur la base des résultats obtenus (diagramme 4'a et 4'b - fig. 9).

Conditions d'acceptabilité :

- 1) $\bar{N}' \geq 44\ 000$ $\sigma^2 \leq 0,025$
- 2) $\bar{N}' \geq 44\ 000$ $\sigma^2 \leq 0,025 + 10\ %$
- 3) $\bar{N}' \geq 44\ 000 - 10\ %$ $\sigma^2 \leq 0,025$

(95 % des moyennes étant supérieurs à 44 000 et 95 % des variances étant inférieurs à 0,025).

Une des trois conditions doit être réalisée.

Pour les fils clairs, on se fixera également un nombre d'essais égal à 12.

9.5 Essais réalisés sur fils clairs de 3 mm de diamètre.

1) Les limites de tensions $94 + R/9$ et $26 - R/9$ donnant lieu pour les fils de 2 mm à un nombre de cycles à rupture *indépendant* de la

résistance unitaire des fils.

La formule en $R/9$ ne convient donc pas pour les fils de 3 mm.

2) Toutes les moyennes des séries se trouvent en dessous du nombre de cycles à rupture moyen des fils clairs de 2 mm de diamètre ($\bar{N}' = 68\ 350$ cycles).

Les fils de 3 mm se comportent donc différemment des fils de 2 mm : ils offrent, à sollicitation égale, une moins bonne tenue à la fatigue.

Il n'a pas été possible de poursuivre les essais sur fils de 3 mm comme on l'a fait pour les fils de 2 mm. Cependant, il est évident que cette recherche devrait être menée à bonne fin pour pouvoir établir des critères de qualité pour les fils de 3 mm et voir dans quelle mesure ils diffèrent des fils de 2 mm et si, dans ces conditions, l'interpolation de ces critères est possible pour tous les diamètres de fils compris entre 2 et 3 mm.

La même chose est à faire également pour les fils de 1,5 mm .

10. Conclusions.

1) Les limites de tensions $94 + R/9$ et $26 - R/9$ semblent convenir aux fils de 2 mm clairs ou galvanisés; en effet, on obtient bien un nombre de cycles à rupture indépendant de la résistance unitaire des fils; ce résultat est d'autant plus remarquable que l'on a essayé des fils d'origines diverses et que, dès lors, la relation ci-dessus est générale. D'autre part, ceci montre que la résistance à la fatigue augmente nettement moins vite que la résistance à la rupture du métal, en fait elle augmente comme le neuvième de cette dernière.

2) La dispersion des résultats dans une série de fils est plus grande pour les fils clairs que pour les fils galvanisés.

DIAGRAMME 5 - Fils clairs ϕ 3 mm.

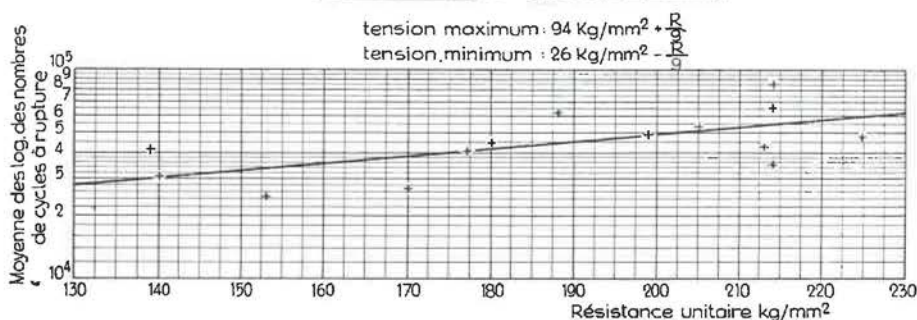


Fig. 10.

résistance unitaire des fils, on a essayé d'appliquer la même formule aux fils clairs de 3 mm. Dans ce dernier cas, comme on peut le constater sur le diagramme 5, (fig. 10), le nombre de cy-

3) La résistance à la fatigue des fils clairs est nettement supérieure à celle des fils galvanisés de même diamètre.

4) Le diamètre du fil influence la résistance à la fatigue, celle-ci semble diminuer avec un diamètre croissant du fil (cfr. fils 3 mm et 2 mm clairs).

5) La dispersion des résultats, bien que considérable, paraît provenir presque totalement de l'hétérogénéité des fils eux-mêmes et constitue en quelque sorte une mesure de l'homogénéité d'un lot de fils.

6) Les résultats obtenus ont permis d'établir un critère de qualité pour les fils neufs.

Ce critère de qualité a pu être décomposé en deux parties : exigences sur la moyenne des essais et exigences sur l'homogénéité des lots de fils; ces exigences aboutiraient au rebut de 10 % environ des lots de fils acceptés jusqu'à présent mais présentant des déficiences importantes dans leur résistance à la fatigue, déficiences qui ne peuvent être mises en évidence par les essais classiques.

7) Ce résultat est certes très important, mais il est possible de tirer plus encore des présents essais; en effet, la question de l'allègement du poids mort étant à l'ordre du jour, pourquoi ne consentirait-on pas à une marche du câble avec coefficient de sécurité réduit dans les cas où les essais de fatigue auraient décelé une résistance à la fatigue des fils meilleure que la normale ?

Une tentative de ce genre ne présenterait aucun danger réel, car il serait possible de suivre l'évolution du câble à l'aide de l'A.C.M.I., comme cela se fait d'ailleurs actuellement dans de nombreux cas de fonctionnement en dérogation.

8) Ces résultats sont limités aux fils d'environ 2 mm; en effet comme il a été signalé ci-dessus, la résistance à la fatigue des fils dépend du diamètre et il serait donc nécessaire de faire des essais sur fils de divers diamètres afin de trouver la formule correcte pour chaque diamètre.

9) En ce qui concerne les fils galvanisés, les présents essais ont montré qu'à l'état neuf, les fils galvanisés résistaient nettement moins bien que les fils clairs; il faut se garder d'extrapoler ce résultat aux conditions de service des câbles, car la dégradation des fils, notamment par corrosion, est retardée pour l'acier galvanisé de sorte qu'en pratique le comportement des deux types de fils dépendra beaucoup des conditions d'agressivité de l'atmosphère des puits.

Dans un puits sec, il ne saurait y avoir avantage à utiliser les fils galvanisés (puisque en l'absence de corrosion, ils ont une moins bonne tenue à la fatigue); en revanche, dans un puits agressif, les fils galvanisés montreront tous leurs avantages.