Les résultats de l'examen magnétique des câbles de mines [1]

par J. STREBELLE,

Ing. Civil A.I.Ms, Chef de Service à l'A.I.B.

SAMENVATTING

Na de rol te hebben aangestipt die de A.I.B. en het Nationaal Instituut voor de Steenkolennijverheid vervuld hebben bij de verbreiding van de magnetische controle der ophaalkabels, haalt de auteur de verschillende stadia van deze studie aan en leidt hij de betekenis van de proefondervindelijke vaststelling er uit af.

Handelend over de huidige staat van het probleem en over de praktische resultaten die tot nu toe verkregen werden, bewijst hij dat een duidelijke correlatie kon aangetoond worden tussen de aanduidingen van de magnetische onderzoekingen en het weerstandsverlies in procent van de kabels. De ervaring in België opgedaan laat nu toe een ophaalkabel veilig te laten werken gedurende een langere tijd.

In een aanvullende nota, begeleid door een tabel waarin de resultaten zijn aangeduid die op ophaalkabels van verschillende types verkregen werden, herinnert de auteur aan enkele begrippen van proefondervindelijke statistiek die nuttig zijn gebleken bij de huidige studie.

RESUME

Après avoir rappelé le rôle de l'A.I.B. et d'INICHAR dans le développement en Belgique des examens magnétiques des câbles de mines, l'auteur retrace les principales étapes de la recherche et dégage la signification des constatations expérimentales relevées.

Traitant de l'état actuel de la question et des résultats pratiques obtenus à ce jour, il apparaît une corrélation très nette entre l'état de dégradation d'un câble, chiffré en pour-cent de perte de résistance, et les indications du relevé magnétique. L'expérience belge en la matière permet actuellement de maintenir en service en toute sécurité un câble d'extraction pendant un temps plus long.

Suit une note complémentaire illustrée par un tableau des résultats obtenus sur divers types de câbles ; cette note a pour but de rappeler certaines notions de statistique expérimentale qui se sont avérées utiles dans l'étude.

1. Introduction.

La question de la sécurité de fonctionnement des câbles de mines est l'une de celles dont l'intérêt ne fait que s'accentuer ; un des facteurs de cette sécurité est le jugement objectif, par une méthode non destructive, de l'état d'un câble en service.

La seule méthode entièrement objective qui ait pu s'affirmer jusqu'à présent consiste en un examen magnétique sur toute la longueur du câble avec enregistrement des signaux obtenus et il semble que, parmi les diverses variantes à cette méthode, seule se soit imposée la méthode avec magnétisation continue à saturation et bobines de mesure fixes.

Cette méthode qui a fait ses débuts il y a plusieurs décades à la Seilprüfstelle de la Berggewerkschaftskasse, à Bochum, a fait l'objet de modifications et d'études importantes à partir de 1953 à l'Association des Industriels de Belgique à Bruxelles sous l'égide

(1) **Voir aussi :**
— « Récents progrès en matière de contrôle de la sécurité des câbles d'extraction » (Annales des Mines de Belgique - novembre 1956).
— « Le bilan de deux années de pratique d'inspection des câbles de mines avec l'appareil magnétique A.C.M.I. » (Annales des Mines de Belgique - mai 1957).

d'Inichar et est devenue actuellement un outil fidèle, appliqué journellement au contrôle des câbles d'extraction.

2. Buts initiaux et premiers résultats.

A l'origine, la question du contrôle des câbles s'est posée de la façon suivante : *trouver un appareil suffisamment sensible pour détecter un seul fil brisé dans un câble.*

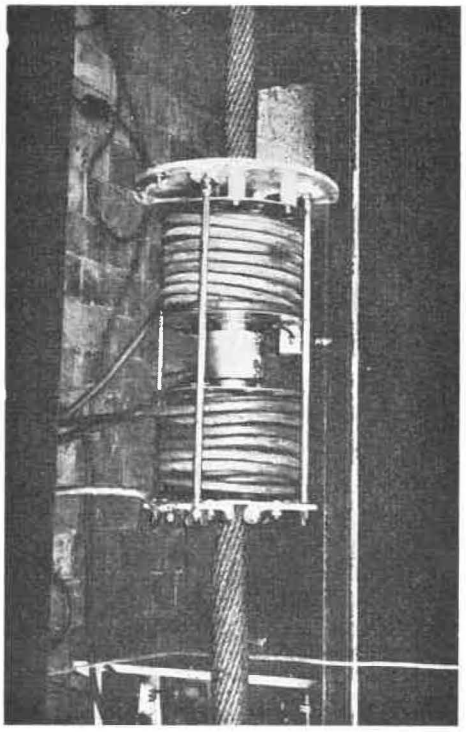

Fig. 1. — Aspect de l'appareil placé sur le câble en position de contrôle.

Sans revenir sur les détails de l'appareil ni sur sa mise au point, signalons que ce résultat fut obtenu rapidement et sans grand mal ; ce succès trop rapide fut certainement une des causes du piétinement de cette méthode que l'on enregistra pendant de trop nombreuses années.

Ce résultat ne suffisait pas, car il était aussi nécessaire que :

— l'appareil soit fidèle ;

— qu'il soit dépourvu d'indications parasitaires tant d'ordre électrique que mécanique.

C'est à cette besogne que s'attela l'A.I.B. dès le début de ses recherches et, au bout de plusieurs mois, un appareillage convenable put être construit.

Ce nouveau pas en avant une fois franchi, il ne fallut pas attendre longtemps pour se rendre compte que tout restait à faire au sujet de cette méthode: en effet, la détection et le dénombrement des fils brisés dans un câble n'apportaient qu'une bien faible contribution à l'estimation de sa sécurité de fonctionnement. Les autres facteurs de dégradation

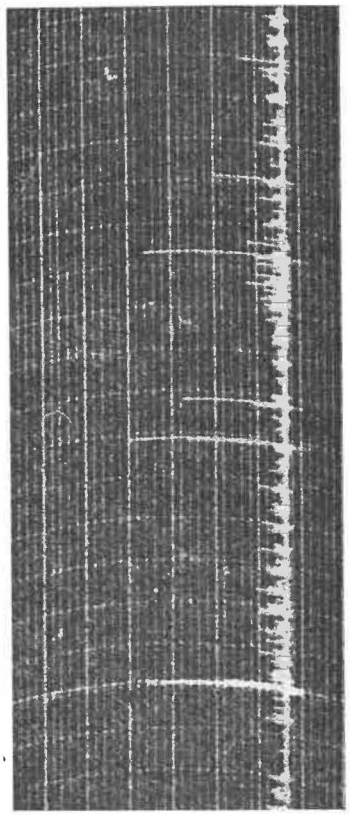

Fig. 2. — Les fils brisés apparaissent sous forme de signaux isolés nets. Le diagramme montre en plus un léger bruit de fond.

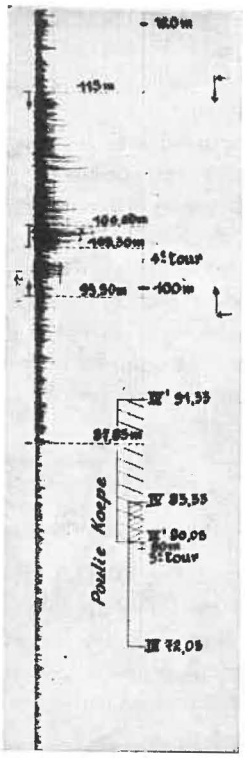

Fig. 3. — Exemple de bruit de fond : à la partie inférieure de la figure apparaît un bruit de fond très faible ; plus haut apparaît un accroissement très notable de ce bruit de fond ; en cet endroit, la perte de résistance a été trouvée égale à 40 %, tandis qu'ailleurs elle n'atteignait que 4 %.

des câbles et, entre autres, la corrosion et l'indentation des fils constituaient des inconnues autrement inquiétantes que les ruptures des fils.

De nombreux efforts furent déployés pour faire sortir des indications de l'appareil, les valeurs relatives de ces facteurs de dégradation ; c'est ainsi qu'à certains moments, on prit plusieurs relevés du même câble à des niveaux différents de magnétisation et autres astuces expérimentales qu'il est hors de propos de développer ici.

Cette partie de la recherche fut certes la plus longue et la plus ingrate, car il était devenu bien inutile de chercher à modifier le côté électrique ou électronique des appareils, la seule question était d'apprendre à interpréter les indications de l'appareil — mise à part la question simple des fils brisés.

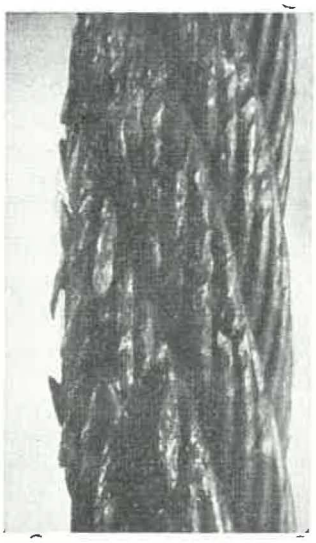

Fig. 4. — Aspect des torons intérieurs du câble dans la zone à fort bruit de fond du diagramme de la figure 3.

Cette longue et opiniâtre recherche, qui fut conduite non seulement en laboratoire mais surtout sur des câbles en service, aboutit finalement à une meilleure compréhension des phénomènes en jeu et eut surtout le grand mérite de mettre aux mains de nos chercheurs un nombre imposant de résultats particuliers et, comme il arrive en ces cas, du nombre de résultats finirent par se dégager des lois générales et bien plus générales qu'on n'eut osé l'espérer.

Les constatations de loin les plus importantes furent celles-ci : *toutes autres choses égales par ailleurs, les portions de câbles donnant lieu à un bruit de fond maximum sur le diagramme sont aussi les plus dégradées* ; la constatation suivante se trouva rapidement établie : *il y a une relation linéaire entre l'amplitude moyenne des bruits de fond et le niveau des dégradations, toutes choses égales par ailleurs.*

L'importance fondamentale de ces constatations mérite considération et explications :

a) Le bruit de fond, en particulier, ne doit en aucun cas être confondu avec des parasites d'ordres électrique, électronique ou provenant d'un mouvement relatif transversal du câble et des bobines. De tels parasites ne sont naturellement pas reproductibles, tandis que le bruit de fond l'est.

Ce bruit de fond est obtenu grâce à une disposition originale et bien précise des bobines de mesure qui les rendent totalement insensibles à tous parasites, mais sensibles aux effets sur le champ magnétique de la corrosion, de l'indentation et de l'usure des fils.

b) Le niveau des dégradations réelles dans un câble est exprimé par une perte conventionnelle de résistance du câble due aux dégradations existantes.

La perte de résistance vraie d'un câble est une grandeur encore inaccessible à l'heure actuelle ; sa détermination exigerait :

1) la connaissance de la charge de rupture du câble en service depuis un temps suffisant pour qu'il soit tassé et assez court pour qu'aucune dégradation ne se soit produite ;

2) la connaissance de la résistance à la rupture du même câble après un long service ; ces essais de rupture devant se faire à la mine ou sur des installations semblables aux molettes et poulies Koepe (2).

Faire de tels essais sur éprouvettes de câble au banc d'épreuve ne fournit pas un chiffre de résistance vraie, tant pour les câbles neufs que pour les câbles usagés, et les résultats obtenus sont très dispersifs.

On s'est arrêté à une estimation simple de la perte en comparant la somme des résistances individuelles de chaque fil du câble d'une part à l'état neuf et d'autre part à l'état usagé (3).

$$\text{Perte } \% = \frac{\Sigma \text{ fils neufs} - \Sigma \text{ fils usagés}}{\Sigma \text{ fils neufs}} \times 100$$

Cette formule a le mérite de la simplicité et celui de se libérer de la notion de perte au câblage ; elle n'a pas la prétention d'exprimer rigoureusement la résistance d'un câble en service, mais simplement de fournir une base de comparaison pour l'estimation des dégradations en relation avec le contrôle magnéto-inductif.

c) Toutes choses égales par ailleurs, l'expression limitative qui revient dans les deux constatations ci-dessus recèle tout le côté difficile et ingrat de ces recherches.

(2) Des études sont en cours à l'A.I.B. en vue de créer un matériel d'essais s'approchant de ces conditions.

(3) Voir : « Le bilan de deux années de pratique d'inspection des câbles de mines avec l'appareil magnétique A.C.M.I. » (Annales des Mines de Belgique - mai 1957).

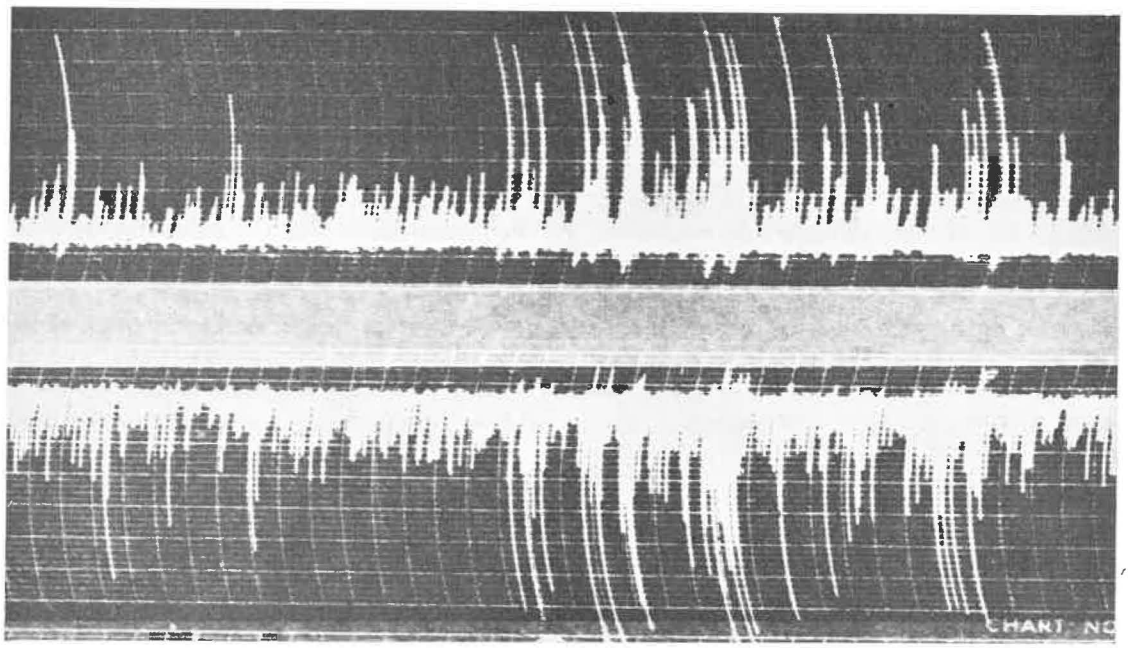

Fig. 5. — La figure montre deux diagrammes pris sur la même portion de câble à des moments différents et présentés l'un en face de l'autre de façon à montrer la fidélité de l'enregistrement. Il s'agit ici d'un tronçon de câble présentant un bruit de fond déjà notable sur lequel viennent se greffer des signaux nets représentant de multiples fils brisés.

La limitation qu'exprime cette expression est une mise en garde contre les extrapolations et les généralisations ; des exemples montreront sa portée : on conçoit fort bien qu'un câble clos ne réagisse pas de la même façon à l'essai magnétique qu'un câble à torons et c'est effectivement ce qui se produit. Il est déjà moins évident que deux câbles à torons puissent réagir d'une façon très différente au même examen ; c'est pourtant ce qui se passe et c'est bien « ce facteur câble » qui a été le plus difficile à approcher et à isoler pour passer du jugement qualitatif au jugement quantitatif de l'état d'un câble donné.

Ce facteur ayant pu être déterminé pour un certain nombre de types de câbles, rien ne s'oppose plus à le déterminer pour tous les autres types de câbles.

3. Etat actuel de la question.

La relation entre les indications obtenues à l'essai magnétique et la perte de résistance conventionnelle est donc linéaire et se schématise par une droite tracée sur un diagramme étalon ou type portant, en ordonnées, les pertes et, en abscisses, la lecture à l'appareil.

Ce diagramme, dont un exemple est donné à la figure 6, est la transposition des résultats qui sont repris dans le tableau I.

On remarque dans ce tableau que des écarts se produisent entre les valeurs attendues des pertes et leur valeur vraie. Cette dispersion est inhérente à toute expérimentation, mais on constate que, sur 72 résultats obtenus sur des câbles très divers, 13 diffèrent de plus de 5 par rapport à la valeur attendue, 9 diffèrent de plus de 6 et 2 seulement diffèrent de plus de 10.

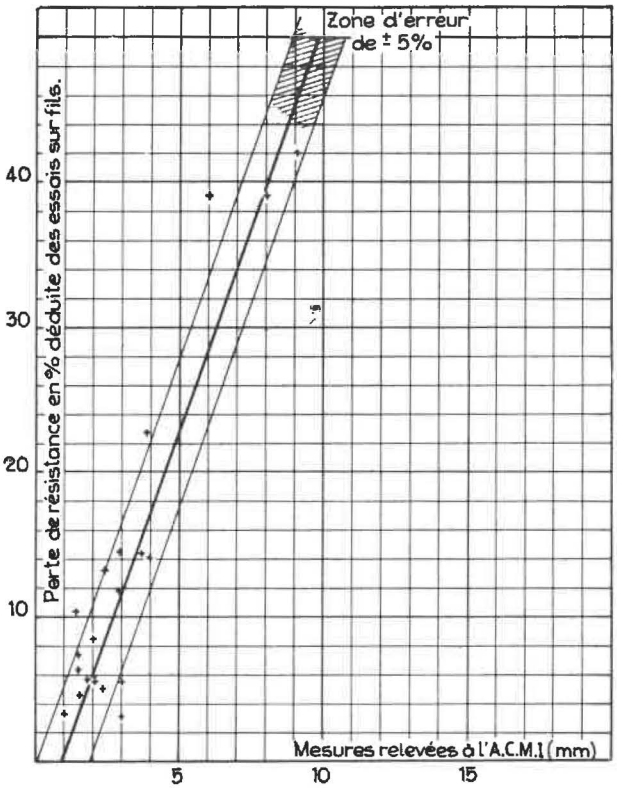

Fig. 6. — Exemple d'un diagramme type ou d'étalonnage permettant de chiffrer la perte de résistance d'un câble à partir du diagramme A.C.M.I.

Ces écarts se manifestent aussi bien en plus qu'en moins et relèvent visiblement d'erreurs accidentelles de mesure.

Observons que ces écarts ne sont pas gênants dans les contrôles de routine des câbles, car on se contente fort bien de savoir qu'un câble a une perte comprise en 30 et 40 %.

Cela n'empêche pas cependant de rechercher ces causes d'erreurs accidentelles et deux d'entre elles sont à présent identifiées.

a) La difficulté de mesurer « la valeur moyenne du bruit de fond » en un endroit du diagramme.

Cette mesure, ou plus exactement cette appréciation, a jusqu'à présent été confiée à une seule personne parfaitement entraînée à ce travail, mais on estime qu'une précision meilleure que 10 % est impossible à atteindre par appréciation visuelle.

Afin de réduire cette erreur, un complément d'appareillage a été construit, qui permet cette mesure par intégration des signaux électriques apparaissant à l'appareil enregistreur.

b) Quand on dépose un câble et que l'on désire y prélever un tronçon pour l'étude comparative des dégradations, on ne peut pas espérer une bien grande exactitude dans la localisation et le découpage du tronçon désiré ; il est certain que des erreurs de localisation de plusieurs mètres ont été commises dans le passé, mais depuis un certain temps déjà on opère, lors du contrôle magnétique, un repérage minutieux et un marquage des tronçons requis pour les essais de comparaison.

c) Il est certain que d'autres causes d'erreur existent et ne sont pas encore connues actuellement; néanmoins, dès à présent, on peut compter sur une amélioration certaine de la précision des diagrammes types.

4. Résultats pratiques.

Le contrôle magnétique des câbles ronds d'extraction est devenu en Belgique une mesure de routine ; l'Administration des Mines Belges impose ce contrôle dans les cas où des dérogations de durée ou de coefficient de sécurité sont accordées.

Pratiquement, les résultats obtenus revêtent deux aspects : détection immédiate et sûre des câbles dangereusement dégradés et en second lieu prolongement, en toute sécurité, du fonctionnement des câbles dont le long temps de service met en doute le bon état, mais qui sont reconnus peu détériorés par suite de l'examen magnétique.

Les contrôles magnétiques se font le plus généralement aux périodes suivantes : le premier lorsque le câble a dépassé les 6/10 de sa durée de vie prévue et en tous cas avant le 18me mois de fonctionnement ; l'examen est répété à intervalles dépassant rarement 3 mois de façon à apprécier correctement la vitesse d'accroissement des dégradations et prévoir en temps utile la période la plus propice à sa mise hors service.

Ces règles sont apparues comme les plus adéquates, mais il arrive que le visiteur de câbles demande un examen spécial à la suite de l'une ou l'autre constatation inquiétante.

5. Conclusions.

Les considérations qui précèdent sont loin d'avoir épuisé le sujet. Seul a été traité le développement en Belgique de la méthode à champ magnétique continu et les résultats tangibles obtenus actuellement.

Entre autres, la question d'appareillage n'a pas été abordée, pas plus que la question des appareils utilisant un champ magnétique alternatif. En ce qui concerne cette dernière méthode qui a fait l'objet de recherches à l'étranger, et de quelques tests pratiques à l'A.I.B., il reste encore beaucoup à faire avant d'en arriver à une connaissance suffisante de l'interaction des différents facteurs de dégradations des câbles et d'autres facteurs qui ne sont pas liés à ces dégradations.

Les prévisions d'avenir sont très encourageantes ; en effet, l'expérience belge de plusieurs années a forcément influencé les critères traditionnels de dépose des câbles. De là, naît et se développe une expérience nouvelle qui permet de mieux apprécier les facteurs du comportement d'un câble, ayant l'outil qui permet d'apprécier son état.

On peut donc espérer voir se modifier dans l'avenir les critères réglementaires qui régissent la dépose d'un câble ou les dérogations accordées dans certains cas spéciaux, modifications qui pourront se faire sans danger dans le sens de l'allongement du temps de service des câbles et de la diminution des coefficients de sécurité.

6. Note complémentaire.

6.a. Pour une compréhension approfondie des points repris en fin du paragraphe 2 et pour répondre à des questions souvent soulevées, il a été jugé utile de reprendre ci-après quelques considérations qu'il faut constamment avoir présentes à l'esprit en matière d'expérimentation.

6.b. Relation entre deux variables.

Le phénomène de la pesanteur, d'après la loi

$$P = Mg \qquad (1)$$

exprime qu'une masse M soumise à l'accélération g de la pesanteur accuse un poids P. Il s'agit là d'une relation linéaire entre les deux variables M et P.

Si l'on prend une série de masses connues et que l'on en mesure exactement les poids, on trouvera des résultats obéissant à la relation ci-dessus et

dépourvus de dispersion, hormis les très minimes erreurs de mesure inévitables.

Il n'en va plus de même si l'on ne procède pas à toute la série de mesures en un même lieu de la surface terrestre, car l'accélération de la pesanteur varie avec le lieu ; dans ce cas, les mesures seront *affectées d'un facteur de dispersion,* ce qui s'exprimera en écrivant autrement que ci-dessus la relation (1) qui devient

$$P = \text{fonction (Masse, lieu)} \qquad (2)$$

Dans ce cas particulier, connaissant à l'avance la valeur de g en chaque lieu, il sera aisé de corriger les résultats et l'on parlera d'un *facteur de correction.*

Mais, comme il arrive le plus souvent, les résultats expérimentaux sont soumis à des écarts provenant de facteurs inconnus ou dont les effets sont inconnus ; à ce moment, on parlera de *dispersion* des résultats, et la relation entre deux variables y et x s'écrira :

$$y = f(x, \alpha, \beta, \gamma, \ldots) \qquad (3)$$

α, β, γ, étant les facteurs inconnus responsables des écarts des mesures.

6.c. La dispersion et la corrélation.

Il suffit de placer sur un diagramme des résultats de mesure pour se rendre compte s'il y a beaucoup de dispersion, mais ce sont les méthodes d'analyses statistiques qui sont aptes à mesurer cette dispersion. Quand il s'agit de relation entre deux variables, on parle de corrélation au lieu de dispersion.

Une relation exempte de dispersion recevra la cote de corrélation 1 (fig. 7).

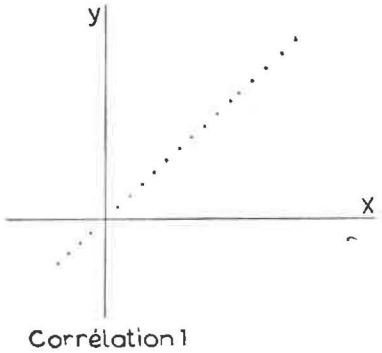

Fig. 7.

Des résultats qui se mettent comme sur le diagramme figure 8 auront une corrélation nulle indiquée par la cote 0.

Entre ces cas extrêmes, viennent se placer les cas que l'on rencontre fréquemment en expérimentation courante.

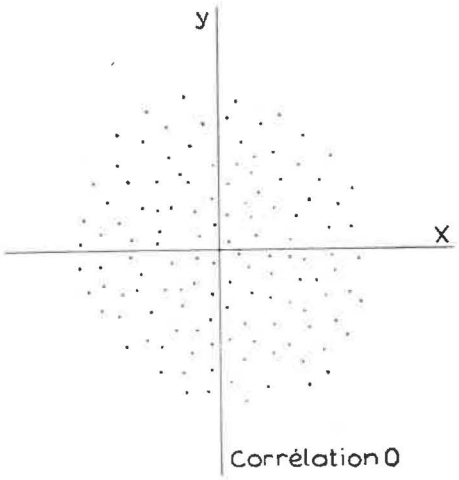

Fig. 8.

On a trop souvent tendance à considérer comme une non-valeur une corrélation qui ne s'approche pas de l'unité et, pourtant, les phénomènes à corrélation faible sont loin d'être dépourvus d'intérêt à tel point que l'on peut dire que les récentes connaissances sur la structure fine de la matière n'auraient pas pu être acquises en dehors des études statistiques de corrélation.

En effet, lors d'une expérimentation, la question principale est : existe-t-il une corrélation — quelle qu'elle soit — entre deux variables ?

Si la réponse des essais est positive, on a mis le doigt sur une relation physique entre deux variables — si ténue soit-elle — et il reste à essayer de découvrir et de maîtriser les facteurs de dispersion, ce que peuvent également donner les méthodes statistiques.

6.d. Cet exposé aura pu mettre en évidence les idées maîtresses suivantes :

1) Quand l'on recherche expérimentalement une relation entre deux variables, il faut s'attendre à l'intervention de facteurs de dispersion.

2) Il ne faut pas s'effrayer de la dispersion apportée par ces facteurs, mais il faut soumettre les résultats à un traitement statistique qui indiquera le degré de corrélation obtenu sans jamais cesser de se laisser guider par le simple bon sens.

3) Si une corrélation notable vient à être mise en évidence, le point de départ est tout trouvé pour procéder à l'étude des facteurs de dispersion, étude qui conduit la plupart du temps à une meilleure compréhension des phénomènes en jeu.

4) Dans tout ceci interviennent des traitements statistiques qui n'ont de signification précise que si l'on peut procéder à un *grand nombre* d'essais.

Faute de maîtriser ces notions fondamentales de statistique, l'expérimentateur risque à la fois de passer à côté de phénomènes intéressants et de commettre des erreurs grossières dans le jugement des résultats observés.

6.f. Retour aux contrôles magnétiques des câbles.

Pour les raisons exposées au § 2 de cette note et ailleurs (1), le problème s'est posé de comparer les deux variables suivantes : bruit de fond des enregistrements obtenus (β) et perte de résistance des fils du câble (p).

Expérimentalement, une relation linéaire dispersée a été établie qui permet d'écrire $p = K\beta$ (fig. 6).

Les résultats et les écarts à cette relation figurant au tableau I permettent d'établir que le facteur de corrélation est de 82 % dans l'exemple des câbles à 18 torons, valeur beaucoup plus favorable que ce qu'on aurait pu espérer au début de la recherche.

L'étude des facteurs de dispersion a pu mettre en évidence l'intervention de :

1. type de câble ;
2. composition des torons ;
3. diamètre du câble ;
4. erreur de mesure du bruit de fond ;
5. fluctuation de la vitesse de passage du câble dans l'appareil ;
6. exactitude du repérage sur le câble des tronçons à étudier pour la corrélation ;
7. profondeur du défaut dans le câble ;
8. nature des dégradations ;
9. autres facteurs mal connus.

Le bilan de l'étude se solde donc comme suit :

— Bon indice de corrélation ;

— Mise en évidence des facteurs de dispersion cités ci-dessus ;

— Connaissance approfondie et neutralisation des facteurs 1, 2, 3, 4, 5, 6 ; les trois derniers n'ont été neutralisés que récemment et permettent de s'attendre pour l'avenir à une nouvelle augmentation de l'indice de corrélation.

TABLEAU I.

Tableau de comparaison entre la perte de résistance d'un câble déduite d'essais de traction sur fils et la perte évaluée d'après les signaux donnés par le diagramme A.C.M.I.

Types de câbles considérés.

A — 11 (9 + 9 + 1)
6 (9 + 9 + 1) Ø env. 60 mm
6 (6 + 1)

B — 12 (9 + 9 + 1)
6 (9 + 9 + 1) Ø env. 60 mm
6 (6 + 1)

C — 17 (6 + 1)
11 (6 + 1) Ø env. 60 mm
6 (6 + 1)

D — 11 (9 + 3 + 3)
6 (9 + 3 + 3) Ø env. 55 mm
6 (6 + 1)

E — 6 (16 + 10 + 6 + 1) Ø 30 mm

F — 7 torons plats — 24 fils
5 torons plats — 20 fils Ø 52 mm
4 torons plats — 7 fils

G — 11 (10 + 10 + 6 + 1)
6 (10 + 10 + 6 + 1) Ø env. 60 mm
6 (6 + 1)

Type de câble	Perte en % (essais mécaniques)	Perte évaluée d'après le diagramme A.C.M.I.
A	26,5	29,5
A	23,0	18,0
A	2,8	2,6
A	6,8	14,6
A	4,9	5,6
A	3,0	—
A	8,6	13,0
A	7,9	5,6
A	9,4	8,8
B	37,0	37,5
B	31,0	31,7
B	35,5	22,0
B	21,5	14,5
B	16,0	18,0
B	16,5	27,5
B	15,0	18,0
B	15,2	14,5
B	14,2	11,2
B	14,0	17,4
B	14,0	12,0
B	12,7	6,0
B	12,5	9,5
B	12,0	14,5
B	11,0	12,0
B	10,5	12,8
B	9,5	9,5
B	9,0	5,0
B	8,8	18,0
B	6,5	2,0
B	6,2	5,0
B	5,0	7,7
B	4,5	11,0
B	4,6	4,8
B	3,0	2,0
B	3,0	1,5

TABLEAU I (suite 1).

Type de câble	Perte en % (essais mécaniques)	Perte évaluée d'après le diagramme A.C.M.I.
C	42,0	36,4
C	33,7	41,6
C	28,5	22,7
C	14,7	11,6
C	11,3	11,6
C	12,1	3,2
C	12,0	17,0
C	11,3	11,6
C	9,9	15,6
C	4,8	6,0
C	4,6	4,6
C	4,2	4,6
C	3,2	8,8
C	3,0	—
C	1,9	—
C	1,6	1,8
C	—	3,2
C	1,0	4,6
D	12,8	11,5
D	13,2	14,6
D	12,3	11,5
D	10,1	11,5
D	0,7	2,0

TABLEAU I (suite 2).

Type de câble	Perte en % (essais mécaniques)	Perte évaluée d'après le diagramme A.C.M.I.
E	16,8	17,4
E	14,0	13,4
E	5,1	5,4
E	5,8	5,4
F	16,4	17,8
F	17,7	16,0
F	18,9	16,0
F	7,9	8,4
F	9,2	8,4
G	26,5	26,5
G	16,5	17,0
G	12,4	12,4
G	7,4	10,0
G	4,3	3,0

72 *résultats.*

48 résultats s'écartent de moins de 5 % du résultat tiré du diagramme de l'A.C.M.I.

13 résultats s'écartent de plus de 5 % du résultat prévu par l'A.C.M.I.

9 résultats s'écartent de plus de 6 %.

2 résultats s'écartent de plus de 10 %.