

Méthodes dynamiques modernes pour l'essai des bandes transporteuses ininflammables pour le fond

par F. BERNHARDT,

Dr. Ir. à la Phoenix Gummiwerke A.G., Harburg.

RESUME

Lors de leur mise en service en 1952, les bandes transporteuses dites « ininflammables » ont donné lieu à des déboires. A l'usage, elles devenaient raides et se déchiraient rapidement. Ces courroies avaient cependant satisfait aux essais mécaniques imposés par les normes.

En étudiant la question de près, on s'est aperçu que les essais normalisés étaient tous du type statique et ne donnaient aucune indication sur la résistance des courroies au choc et à la fatigue.

On a donc mis au point des essais dynamiques. Dans l'essai de rupture par choc, une éprouvette est détruite par la chute d'un mouton à pendule et on mesure l'énergie absorbée par la rupture. Dans l'essai de fatigue (oscillographe à choc), on laisse tomber d'une hauteur déterminée un marteau de poids et de forme définis sur une éprouvette tendue horizontalement. Le nombre de coups auquel l'éprouvette résiste avant de se rompre est une mesure de sa résistance à la fatigue. Ce dernier essai a permis de différencier les uns des autres des échantillons qui, aux essais définis par les normes, donnaient tous des résultats semblables. Il en résulte que les courroies en néoprène et en chlorure de polyvinyle soumises à l'essai sont, à résistance statique égale, nettement inférieures aux courroies ordinaires en caoutchouc au point de vue résistance à la fatigue produite par la chute de gros fragments sur la bande transporteuse. Ces matières sont aussi beaucoup plus sensibles aux dégradations produites par les angles vifs. La firme allemande PHOENIX aurait cependant mis au point une matière ininflammable dont la résistance à la fatigue serait analogue à celle du caoutchouc.

D'autres essais ont montré qu'il est erroné de croire qu'une courroie qui, neuve, présente un grand allongement, est nécessairement plus résistante au choc que les autres. En effet, après un certain temps de service, cette courroie subit un allongement permanent plus important que celui des autres, et l'allongement élastique qu'elle reste capable de subir devient très faible.

On a enfin perfectionné la détermination de la résistance au feu en remplaçant la flamme d'un brûleur par un courant d'air chauffé électriquement, ce qui permet de travailler dans une atmosphère à teneur en oxygène normale et d'observer le moment exact de l'inflammation.

SAMENVATTING

Wanneer men in 1952 de zg. « onbrandbare » transportbanden in bedrijf gezet heeft, zijn er enkele tegenslagen geweest. Na enige diensttijd werden die banden stijf. Zij scheurden veel sneller dan verwacht. De mechanische eigenschappen van die banden hadden nochtans aan al de genormaliseerde eisen voldaan.

Bij nader onderzoek bleek dat de proeven door de normen vastgelegd, zuiver statisch waren en geen aanwijzing verschaften over de weerstand van de banden aan de schokken en aan de vermoeidheid.

Men heeft dus dynamische proeven ontwikkeld. In de slagbreukproef wordt een monster stukgeslagen door een pendelgewicht, en de verbruikte energie wordt gemeten. In de vermoeidheidsproef (slagoscillograaf) valt een hamer met bepaald gewicht en vorm uit een vastgelegde hoogte op een horizontaal gespannen proefstuk. Het aantal slagen nodig om het proefstuk te breken geeft de maat van de weerstand aan de vermoeidheid. Deze laatste proef heeft het mogelijk gemaakt een onderscheid te maken tussen monsters die voor de genormaliseerde proeven allen gelijkaardige resultaten opgaven. Hieruit volgt dat de onderzochte banden uit neopreen of polyvinylchloride ongetwijfeld minder goed zijn dan degenen uit rubber vervaardigd wat de weerstand betreft aan de vermoeidheid door de val van dikke brokken op de band voortgebracht. Deze grondstoffen zijn ook veel gevoeliger aan stoten toegebracht door scherpe kanten. De Duitse firma « PHOENIX » zou er nochtans in gelukt zijn een onbrandbare grondstof te ontwikkelen waarvan de vermoeidheidsweerstand vergelijkbaar is met die van rubber.

Andere proeven hebben aangetoond dat het verkeerd is te denken dat een band met aanzienlijke rekbaarheid in verse toestand noodzakelijk tegen schokken beter bestand is dan anderen. Na een zekere

diensttijd inderdaad ondergaat zulke band een permanente rek die groter is dan voor andere banden, en de elastische rekbaarheid die dan nog overblijft is zeer gering.

De bepaling van de weerstand tot de verbranding werd ook verbeterd. In plaats van een gasbrander gebruikt men nu een electrisch verwarmde luchtstroom. Hierdoor wordt het mogelijk in een milieu te werken met normaal zuurstofgehalte en het juiste ogenblik van de ontbranding nauwkeurig waar te nemen.

A. — Méthodes d'essai.

Mise au point. - Importance.

La rentabilité des investissements en matériel minier suppose une utilisation toujours plus poussée de ce matériel. On exige en particulier des qualités sans cesse améliorées pour les bandes transporteuses, d'une composition déterminée.

La concurrence entre fabricants joue non seulement dans le domaine des prix, mais agit de plus continuellement sur l'amélioration des produits.

Pour vérifier la qualité de ceux-ci, les consommateurs disposent en Allemagne de nombreux laboratoires effectuant des essais de réception. Il existe de plus un organisme officiel et impartial au Steinkohlenbergbauverein.

Ces laboratoires fixent, en collaboration directe avec les producteurs, les spécifications imposées aux bandes transporteuses, et les adaptent à l'évolution de la pratique industrielle.

De plus, les industries minière et caoutchoutière n'hésitent pas à confier à des instituts rattachés aux universités (1) des recherches sur les propriétés des matériaux et les conditions d'emploi optimum des bandes transporteuses.

Les laboratoires de réception pourraient paralyser les progrès de la fabrication en s'attachant obstinément à des normes périmées. Ce n'est heureusement pas le cas en Allemagne où ces laboratoires travaillent avec compréhension pour le plus grand bien des producteurs et des consommateurs.

En voici un exemple. C'est en 1952 que se répandirent les bandes dites ininflammables. Fin 1952 — début 1953, on constata qu'une série de courroies ininflammables en service, de provenances diverses, présentaient des déchirures transversales en nombre anormalement élevé. Beaucoup de bandes étaient devenues extraordinairement raides (« comme du bois ») et ne répondaient plus aux conditions imposées par le service, dans la même mesure que des courroies de caoutchouc ordinaires ou des courroies ininflammables ne présentant pas cette fâcheuse propriété. Pour résoudre le problème, on a formé une commission de spécialistes des laboratoires des charbonnages et de l'industrie caoutchoutière : il s'agissait de mettre au point un procédé permettant de déterminer quantitativement la tendance au raidissement par des essais statiques, ou, de préférence, dynamiques, et trouver des critères donnant une indication sur les possibilités de service réelles d'une courroie neuve.

* * *

(1) Citons : l'Institut pour la Technique des Transporteurs, du Prof. Dr. Ing. A. Vierling. — L'Institut pour l'Etude des Matériaux (Hanovre), du Prof. Dr. Ing. Matting.

Jusqu'à présent, les seuls essais admis officiellement sont ceux que décrivent les normes allemandes DIN 22102 - 53503 - 53508 - 53516 - 53550. Celles-ci définissent les tolérances de dimension, la spécification des différents types de courroies, le mode de préparation des éprouvettes, la détermination de la résistance et de l'allongement à la rupture des matériaux de revêtement et des âmes textiles, le poids spécifique, la dureté shore et la résistance à l'abrasion (essai au papier émeri) du revêtement, son adhérence au textile, l'absorption d'eau et le vieillissement (par élévation de température).

Toutes les mesures de résistance définies par les normes sont des essais d'arrachement lent (allongement de 30 mm/minute). Il s'agit donc d'essais purement statiques.

Depuis deux ans cependant, on s'est rendu compte que les essais statiques sont insuffisants pour pouvoir prédire comment la courroie se comportera en service. On avait antérieurement déjà effectué des recherches par voie statique pour déterminer les allongements élastiques et plastiques dans les âmes textiles. A cet effet, on charge et décharge alternativement un échantillon sur le banc d'arrachement à faible vitesse (30 mm/min). Ces essais n'ont pas appris grand chose : l'ordre de grandeur des allongements élastiques est de 4 %, mais les bandes qui ont à l'origine un allongement à la rupture de 14 % par exemple ne se comportent pas nécessairement mieux en service que celles qui ont 10 %.

On est alors passé à des essais de rupture « naturelle » (1) par traction ou flexion avec un mouton à pendule. Le travail de rupture déterminé dans cet essai ne donne cependant des renseignements que sur l'échantillon à l'état neuf. On ne peut encore rien en déduire de sûr au sujet de la durée de vie probable d'une courroie entrant en service. C'est pour remédier à cette lacune que l'auteur et ses collaborateurs ont été amenés à mettre au point un essai de fatigue conçu de façon à reproduire le mieux possible les conditions de contrainte rencontrées en service pratique.

B. — Essais dynamiques.

1) Le travail de rupture - Considérations générales.

Quand une éprouvette ou un corps quelconque est sollicité jusqu'à la rupture, l'intégrale du produit tension \times allongement correspond au travail de rupture. En principe, la durée de l'essai n'intervient pas. Cependant, il peut se faire que le travail de

(1) Le texte allemand porte « spontane Prüfungen » : des essais où on laisse les phénomènes se produire de la façon la plus spontanée, la plus naturelle possible.

rupture soit plus élevé quand l'essai est rapide (rupture par choc ou « naturelle ») parce que les phénomènes de relaxation font dépendre de la vitesse de déformation, la force nécessaire pour produire une déformation donnée. D'autre part, la façon dont l'éprouvette est montée sur le banc d'essai a de l'importance : par exemple, l'essai de rupture par choc d'une éprouvette travaillant en flexion absorbe la moitié du travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette de mêmes dimensions sollicitée par choc en traction.

Le diagramme schématique (fig. 1) montre le travail absorbé par la rupture d'éprouvettes de sections identiques en fonction de leur longueur. Le trait interrompu se rapporte à l'essai de traction lente, le

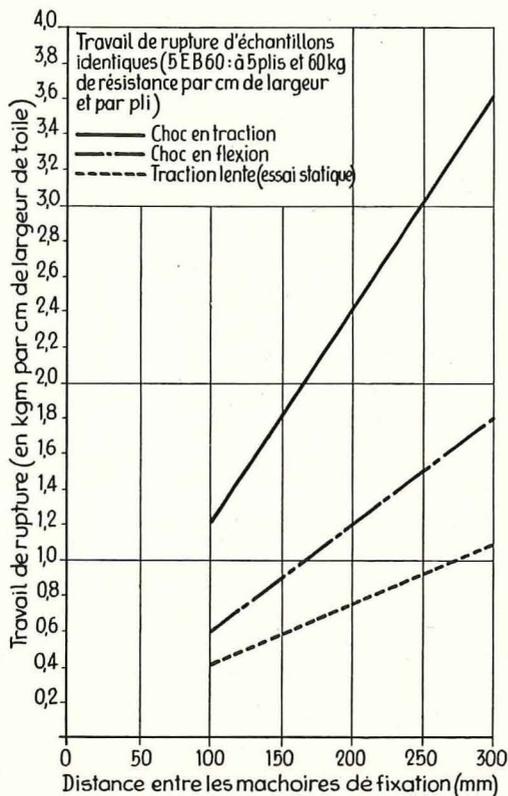


Fig. 1. — Travail de rupture d'échantillons identiques (5 E B 60 : à 5 plis et 60 kg de résistance par cm de largeur et par pli) pour différents processus de rupture.

trait continu à l'essai de choc en traction, et le trait mixte à l'essai de choc en flexion. En comparant les deux premières droites (traction lente ou brutale), on voit l'influence de la relaxation. Les deux dernières (traction et flexion) montrent l'influence du mode de fixation de l'éprouvette. Dans chaque cas, le travail croît approximativement proportionnellement à la longueur de l'échantillon.

En général, quelle que soit la vitesse de l'essai (lent ou dynamique) et le mode de sollicitation (traction ou flexion) le travail de rupture est une fonction assez simple de l'allongement et de la résistance à la rupture.

Si donc on négligeait l'influence des phénomènes de relaxation, on pourrait se dispenser d'effectuer

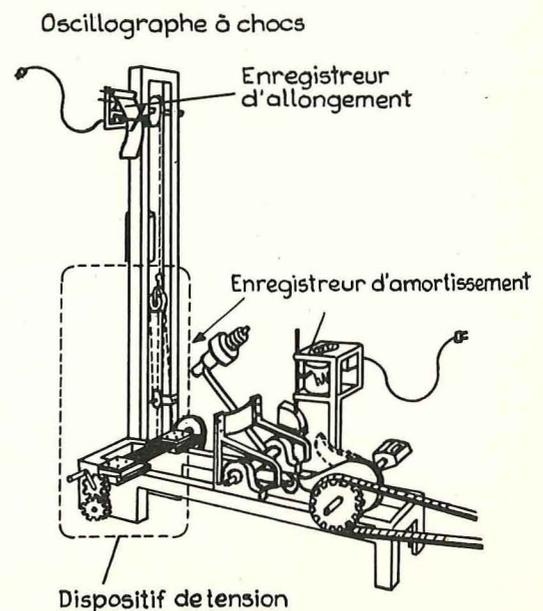
les essais de rupture naturelle (par choc) puisqu'il est possible de calculer le travail de rupture à partir de l'allongement. Cela reviendrait à admettre l'opinion très répandue que c'est l'allongement à la rupture qui est le facteur déterminant de la résistance aux chocs d'une courroie. Cette manière de voir est fautive ; c'est justement à cause de la variation de la résistance à la déformation du caoutchouc renforcé par des âmes textiles, en fonction de la vitesse de déformation (relaxation), qu'il est indispensable de soumettre les échantillons à l'essai de rupture « naturelle » (dynamique ou par choc).

Mais cela ne suffit pas encore. Au cours de l'utilisation de la bande, les âmes textiles subissent un écrasement qui en disloque les fils et les affaiblit. Ce phénomène provoque une diminution de la résistance à la rupture et du travail absorbé mesuré à l'essai dynamique de rupture par flexion ou par traction. C'est pourquoi, il faut exécuter des essais de longue durée si l'on veut avoir des indications sérieuses sur le comportement futur de la courroie. Ces essais doivent permettre de préfigurer en quelque sorte l'histoire d'une courroie avant sa mise en service.

2) Oscillographe à chocs.

Les praticiens du fond attribuent l'origine principale des dégradations constatées aux chocs d'impact des produits sur la courroie. C'est ce qui a amené l'auteur à proposer une épreuve de choc par percussion répétée. Il s'agit en fait d'un essai de choc et de fatigue sur un échantillon travaillant en flexion.

Un marteau d'un poids déterminé tombe d'une hauteur déterminée sur une éprouvette tendue transversalement sous une tension définie (choc primaire). Il rebondit librement un certain nombre de fois (chocs secondaires), selon l'élasticité et les propriétés amortissantes de l'échantillon. Quant il est revenu



Figé 2. — Oscillographe à chocs.

au repos, un système mécanique le ramène à son point de départ et le processus de chocs et de rebondissements successifs à des hauteurs décroissantes se répète.

Le trajet du marteau pendant son rebondissement est enregistré en fonction du temps, ce qui permet de déterminer l'énergie absorbée par l'échantillon à chaque bond et de calculer l'amortissement des oscillations. L'échantillon est maintenu sous tension par deux mâchoires, reliées par un système de deux vis (droite et gauche) et des engrenages à un palan. Un contrepoids fixé au palan exerce un effort constant, indépendant de l'allongement de l'éprouvette, et ses déplacements permettent d'enregistrer cet allongement au cours de l'essai (fig. 2).

Le poids du marteau est déterminé en fonction de la hauteur de chute de façon que le travail correspondant soit en tout cas inférieur au travail de rupture de l'échantillon neuf, déterminé par l'essai de rupture par choc en flexion.

Dans le cas présent, le matériau de l'échantillon subit, sous les chocs répétés, une désintégration progressive, jusqu'à ce que le travail qu'il est capable d'absorber avant rupture devienne inférieur à l'énergie potentielle du marteau en position de départ. Cet état correspond à l'intervalle entre l'avant-dernier et le dernier coup, auquel se produit la rupture.

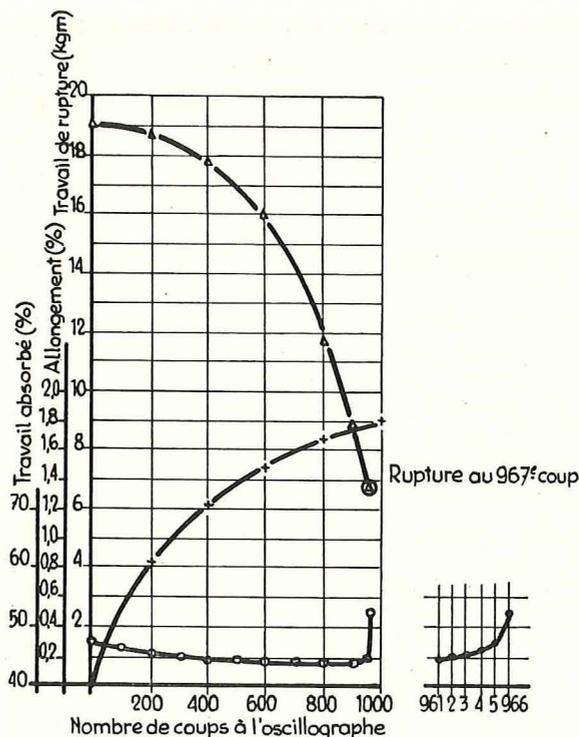


Fig. 4. (diagr. 2). — Travail de rupture (choc en flexion) et allongement en fonction du degré de fatigue.

Mouton à pendule		Oscillographe
Hauteur de chute	0,442 m	0,442 m
Poids du marteau	71,35 kg	12,5 kg
Energie	31,4 kgm	5,62 kgm
Longueur libre de l'échantillon	0,27 m	

Echantillon n° II : Composition : 5 B 60
 Résistance : 78 kg/cmL
 Allongement : 13,6 %
 Longueur totale : 0,42 m
 Longueur entre mâchoires : 0,27 m
 Largeur : 0,04 m

C'est ainsi que l'on peut constater par exemple que le travail de rupture par choc en flexion d'un échantillon résistant à 19 kg/m à l'état neuf, tombe à 5,52 kg/m après 966 coups d'un marteau de poids déterminé.

Supposons qu'une autre courroie donne à l'état neuf le même travail de rupture, soit 19 kg m; mais que, par suite de la désintégration du matériau sous les chocs et de la diminution de l'élasticité de l'échantillon après allongement permanent, le travail de rupture tombe à 5,52 kg m après 100 coups seulement. Il est bien clair que cet échantillon est de bien moins bonne qualité que le précédent en ce qui concerne la résistance à des contraintes de choc analogues à celle réalisée dans l'essai décrit ici.

Le diagramme fig. 3 donne, en fonction du nombre de coups primaires subis par un échantillon sur l'oscillographe à chocs, le travail de rupture que cet échantillon est encore capable d'absorber par choc en flexion.

Pour établir ce diagramme, on a procédé de la manière suivante :

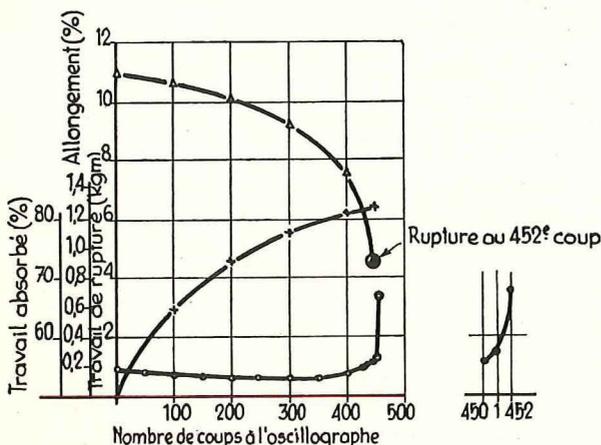


Fig. 3. (diagr. 1). — Travail de rupture (choc en flexion) et allongement en fonction du degré de fatigue.

Mouton à pendule		Oscillographe
Hauteur de chute	0,442 m	0,442 m
Poids du marteau	71,35 kg	10 kg
Energie	31,4 kgm	4,42 kgm
Longueur libre de l'échantillon	0,27 m	

Echantillon n° I : Composition : 5 E B 60
 Résistance : 62,4 kg/cmL
 Allongement : 12,2 %
 Longueur totale : 0,35 m
 Longueur entre mâchoires : 0,27 m
 Largeur : 0,04 m

Courbe supérieure : travail de rupture au choc en flexion
 Courbe moyenne : allongement permanent de l'échantillon
 Courbe inférieure : amortissement : % de l'énergie du marteau absorbé par l'échantillon lors du choc primaire.

Dans chaque courroie à étudier, on a découpé 20 éprouvettes contiguës. Trois de celles-ci sont placées à l'état neuf dans l'oscillographe à chocs et martelées jusqu'à rupture. La courroie à laquelle se rapporte la fig. 3 casse au 452^e coup, celle de la fig. 4 au 967^e coup.

On prend alors des couples d'éprouvettes et on leur fait subir respectivement 100, 200, 300, 400 et 451 coups pour la première courroie et 200, 400, 600, 800, 900 et 965 coups pour la seconde. Après cette préparation, on enlève les échantillons de l'oscillographe à chocs et on les soumet à l'essai de rupture par choc en flexion sur le mouton à pendule. Ce sont les travaux de rupture obtenus dans cet essai qui sont portés en ordonnées et donnent la courbe supérieure des diagrammes (fig. 3 et 4) en fonction du nombre de coups.

On a également reporté sur ces diagrammes l'amortissement (% de l'énergie cinétique absorbée lors du choc primaire) et l'allongement permanent de l'échantillon.

Il ressort de ces courbes que l'amortissement diminue d'abord jusqu'à atteindre un minimum, par suite de l'allongement plastique de l'échantillon; si l'on pousse le processus de désintégration plus loin, l'amortissement augmente de nouveau et atteint, pour un nombre de coups approchant de la rupture, une valeur nettement plus élevée que celle de l'échantillon neuf.

Il est curieux de constater que l'échantillon qui a subi 965 percussions dans l'oscillographe a donné, à l'essai de choc en flexion, un travail de rupture précisément égal à l'énergie correspondant à la chute du marteau de l'oscillographe. L'échantillon resté sur l'oscillographe a cédé au 967^e choc.

Le diagramme fig. 3 se prête aux mêmes observations.

Cette concordance a pu être observée à de nombreuses reprises. On peut donc raisonnablement admettre qu'au moment de la destruction des éprouvettes sur l'oscillographe à chocs, l'énergie du marteau de l'oscillographe correspond au travail de rupture, tel qu'on pourrait le mesurer par l'essai de choc en flexion sur le mouton à pendule.

On peut ainsi, à partir du nombre de coups, du poids du marteau et de sa hauteur de chute, établir des précisions concernant la durée de vie probable d'une courroie.

Les sollicitations réalisées sur l'oscillographe à chocs peuvent se comparer de la manière suivante à celles qui se produisent en service; si une courroie subit en un même point des coups répétés de la même violence que ceux de l'oscillographe, elle cédera probablement après un nombre de coups peu différent. Mais comme le marteau rebondit librement plusieurs fois, à chaque cycle de la machine d'essai correspond une série d'impacts de violence décroissante, représentant la chute sur la bande de morceaux de différents grosseurs du produit transporté. Le plus gros morceau correspond au poids du marteau. Pratiquement, en vertu des lois de la probabilité, un point déterminé de la courroie ne subira qu'après un temps de service assez long un nombre

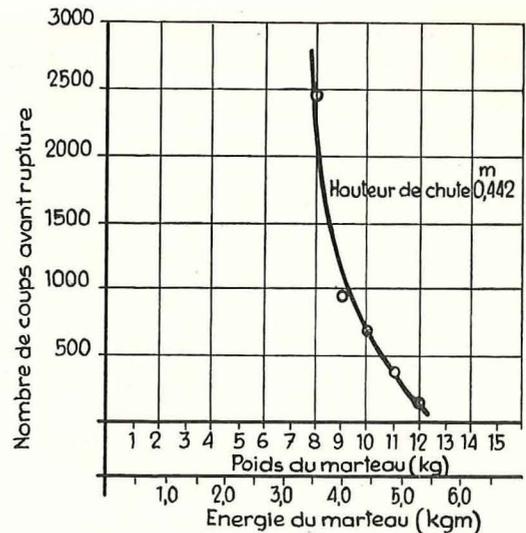


Fig. 5. (diagr. 5). — Relation entre le nombre de coups subis et le poids du marteau à l'oscillographe.

Composition de la bande :	5 E B 60
Largeur de l'éprouvette :	40 mm
Longueur libre :	270 mm

de coups de l'ordre de ceux qui sont réalisés à l'oscillographe.

La fréquence des impacts dépend en fin de compte des conditions de service, qui peuvent être très diverses, de sorte qu'il n'est pas possible d'établir un coefficient de proportionnalité numérique, reliant les résultats de l'oscillographe à la durée de vie probable, mais on pourra cependant affirmer avec certitude que, dans les mêmes conditions de service, une courroie qui résiste à 100 coups sur l'appareil cassera sensiblement plus vite qu'une courroie qui résiste à 1000 coups ou plus.

Le diagramme fig. 5 donne la relation entre le poids du marteau et le nombre de coups supportés par un échantillon.

Le tableau 1 permet de comparer les nombres de coups supportés par deux courroies de texture analogue (5 plis résistant à 60 kg/cm de largeur) mais de fabrications différentes. La courroie A est en néoprène, la courroie B en matériaux ordinaires. On a étudié l'influence du poids et de la forme de la tête du marteau, ainsi que celle du revêtement de l'échantillon.

La supériorité de la courroie B (caoutchouc) apparaît clairement. D'autre part, comme on pouvait s'y attendre, la tête de marteau sphérique avec 5 mm de rayon réalise une contrainte beaucoup plus sévère (surtout pour les marteaux de poids élevé) que la tête de 10 mm de rayon (c'est cette dernière qui est employée actuellement).

L'influence du revêtement est spécialement marquée pour la bande de néoprène. Pour la bande de caoutchouc, elle ne se fait sentir d'une façon bien nette qu'avec la tête de 5 mm de rayon.

TABLEAU I.

Revêtement	Nombre de coups subis à l'oscillographe à chocs avant rupture.							
	Bande A en néoprène				Bande B en caoutchouc			
	En place		Enlevé		En place		Enlevé	
	10 mm	5 mm	10 mm	5 mm	10 mm	5 mm	10 mm	5 mm
Rayons de la tête hémisphérique du marteau								
Poids du marteau 12 kg	2				751	520	466	12
Poids du marteau 11 kg	18				1076	710	944	25
Poids du marteau 10 kg	70	35			1305	894	1253	93
Poids du marteau 9 kg	189	111						160
Poids du marteau 8 kg	432	170	120	3				514
Poids du marteau 7 kg	567	466	174	69				701
Poids du marteau 6 kg	1965	1515	806	214				

On a relevé les allongements permanents dans les différentes parties des éprouvettes. Pour la bande en caoutchouc, ces allongements sont également répartis sur toute la longueur de l'éprouvette. Pour la bande en néoprène, par contre, la partie centrale (25 mm de part et d'autre du point d'impact) s'allonge trois fois plus que les extrémités et deux fois plus que l'ensemble de l'éprouvette. En d'autres mots : avec la courroie de caoutchouc, le choc se transmet régulièrement jusqu'aux mâchoires de fixation, tandis que dans le néoprène ses effets restent concentrés dans les environs immédiats du point d'impact. Cette dernière courroie a donc une mauvaise capacité d'absorption des chocs.

On constate que l'allongement augmente avec la durée de l'essai de fatigue, c'est-à-dire si on allège le marteau, ou si on augmente le rayon de courbure de sa tête ou encore si on protège la courroie au moyen d'un revêtement de caoutchouc. Les allongements sur l'ensemble de l'éprouvette varient de 0,5 à 2 % pour le néoprène et de 0,2 à 1,8 % pour le caoutchouc.

Dans tous ces essais, les éprouvettes étaient soumises à une tension de 6 kg/cm de largeur et par pli correspondant à peu près à la tension des courroies en service. Notons que les nombres de coups auxquels résistent les éprouvettes maintenues à cette tension sont environ 1,4 fois supérieurs à ceux mêmes des échantillons fixés sur l'appareil sans dispositif de tension (mâchoires fixes).

Dans ce dernier cas, en effet, l'échantillon prend une flèche de plus en plus accusée et la réaction se fait à chaque coup plus brutale.

En traçant des traits parallèles sur le bord de l'éprouvette, dans le sens de l'épaisseur, on peut mettre en évidence le glissement relatif des couches dont est formée la courroie.

Le tableau II rassemble les résultats caractéristiques de l'essai de traction statique, des essais nouveaux de rupture par choc en traction et en flexion

et de l'essai à l'oscillographe pour sept types différents de courroies.

- I : courroie en néoprène.
- II : courroie ininflammable Phoenix (ni néoprène, ni P.V.C.)
- III : courroie en néoprène.
- IV : courroie normale (caoutchouc).
- V : courroie Phoenix (exécution expérimentale).
- VI : courroie en P.V.C. (chlorure de polyvinyle).
- VII : courroie en P.V.C. (chlorure de polyvinyle).
- VIII : courroie en néoprène.

Les échantillons VI et VII proviennent d'une même courroie, mais l'échantillon VII a été soumis aux essais six semaines après le n° VI.

La ligne 10 du tableau donne les valeurs obtenues à l'essai de rupture par choc en flexion sur des éprouvettes de dimensions identiques à celles que l'on place sur l'oscillographe. La hauteur de chute des moutons était identique à celle du marteau de l'oscillographe ; les résultats ne sont donc pas faussés par des différences de vitesses de rupture. C'est dans les mêmes conditions qu'ont été obtenus les diagrammes fig. 3 et 4.

Les nombres de coups de l'oscillographe indiqués à la ligne 12 résultent de la moyenne de trois résultats d'essai, très proches l'un de l'autre.

La ligne 13 du tableau donne le travail absorbé jusqu'à la rupture sous le choc primaire. La ligne 14 donne le travail total absorbé : il inclut donc le travail absorbé lors des chocs secondaires (rebondissements successifs).

Il est intéressant de comparer les n° IV et VIII. L'échantillon VIII souffre beaucoup plus de la fatigue que le n° IV, quoique leurs allongements statiques soient tous deux fort élevés et proches l'un de l'autre.

Ce tableau permet au lecteur que la chose intéresse de faire encore de nombreuses autres comparaisons.

TABLEAU II.

Propriétés mécaniques de quelques types de courroies.

Courroies 5 B 60 : à 5 toiles de coton de 60 kg/cm de résistance nominale chacune.

Caractéristiques des échantillons	N°	VI	VII	III	I	VIII	V	II	IV	
		chlor. de Polyv. (1)		néoprène			Phoenix (2)		caoutch.	
(1) Echantillon										
(2) Matière										
(3) Epaisseur de l'âme	mm	6.5	6.5	6.8	7.6	6.7	6.5	7.5	6.8	
(4) Epaisseur totale	mm	10.1	10.2	11.5	11.7	11.5	10.6	11.7	11.6	
Essai statique (lent)	(5) Résistance	kg/cm par pli	62.6	64	79	62.4	62.5	70	78	75
	(6) Allongement à la rupture	%	14.4	14	6	12.2	16.5	11	13.6	17
	(7) Rapport résistance/allongement	(5) (6) %/10 kg	2.3	2.18	0.76	1.95	2.65	1.58	1.75	2.33
	(8) Travail de rupture	kgm	5.4			5.4			6.8	
Travail de rupture par choc	(9) En traction	kgm	12.5 (5)		12.8	15.5	17.5	13.4	15.6	18
	(10) En flexion	kgm	3.6	9.5	8.5	11.2	30	9.0	19.1	30
Fatigue oscillographique à chocs (4)	(11) % de travail absorbé au choc primaire (15) : (14)		67	73-57	42	54	61	51.7	47	60.4
	(12) Nombre de coups avant rupture		12	534	81	453	525	442	4052 (967)	4581 (2188)
	(13) Travail absorbé aux chocs primaires	kgm	35.6	1530	150	1090	1400	1000	8500 (2510)	11650 (7300)
	(14) Travail total absorbé	kgm	53	2370	359	2000	2300	1060	18000 (5320)	19400 (12000)
	(15) Réduction par fatigue du travail de rupture	%		47	52	39.5	14.8	49	25 (29)	14.8
	(16) Allongement	%	0.66	4.76	0.35	1.28	5.0	2.04	25 (1.75)	4.77

(1) Echantillons identiques mais le n° VII a été essayé six semaines plus tard que le n° VI.

(2) Matières synthétiques ne contenant ni chlorure de polyvinyle, ni néoprène., mises au point par la firme Phoenix, n° V : exécution expérimentale; n° VI : exécution courante.

(3) Echantillon de dimensions anormales.

(4) Hauteur de chute : 0.442 m. Poids du marteau : 10 kg. Energie : 4,42 kgm.

Pour les résultats () des colonnes II et IV : hauteur de chute : 0,442 m. Poids du marteau 12,5 kg. Energie : 5,52 kgm.

Les âmes textiles des échantillons qui résistent à un grand nombre de coups apparaissent fortement effilochées à la section de rupture, tandis que les échantillons qui cassent après un nombre réduit de coups montrent une fracture nette. La figure 6 permet de comparer l'aspect des échantillons II et VI ayant subi respectivement 4052 et 12 coups de marteau.

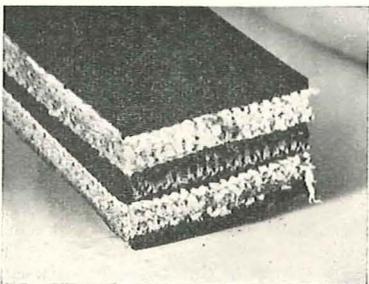
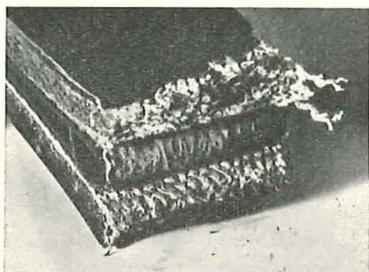


Fig. 6. — Aspect de la cassure réalisée à l'oscillographe à chocs.
En haut : échantillon II = 4052 coups
En bas : échantillon VI = 12 coups

Il arrive que les bandes transporteuses soient peu homogènes et que des échantillons découpés l'un à côté de l'autre dans une même courroie donnent des différences notables à l'essai de fatigue. Ces différences proviennent non pas de la méthode d'essai, mais de l'hétérogénéité de la courroie elle-même.

La fig. 7 montre à droite une éprouvette qui a cassé après 20 coups, à gauche une éprouvette découpée juste à côté de la précédente et qui a résisté à 250 coups. On peut remarquer que la cassure nette de l'échantillon de droite se poursuit sur les 3/5 de la section de l'échantillon de gauche où commence la zone effilochée. Une troisième éprouvette non représentée sur la figure, découpée à gauche de la précédente, présente une cassure effilochée sur toute sa largeur et a résisté à 420 coups.

On peut compter, pour l'essai de fatigue à l'oscillographe, sur une précision de 5 %, ce qui est très satisfaisant pour un essai dynamique de fatigue.

Il est possible cependant que la précision intrinsèque de la méthode soit encore meilleure et qu'une partie de la dispersion citée ci-dessus soit encore due à l'hétérogénéité des matériaux essayés.

En un mot, l'essai à l'oscillographe peut être caractérisé comme un essai de fatigue par choc en flexion, se terminant par un essai de rupture par choc en flexion.

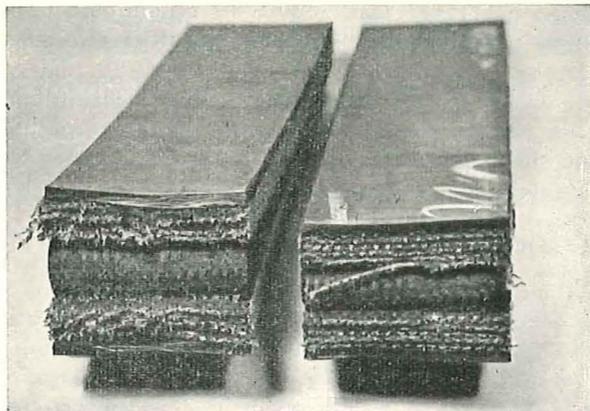


Fig. 7. — Aspect de la cassure réalisée à l'oscillographe à chocs.
Echantillons contigus d'une même courroie.
A droite : rupture après 20 coups - A gauche : rupture après 250 coups.

3) Essai de flexion alternative.

On peut effectuer des essais de fatigue par flexion alternative. Il existe plusieurs procédés : la fatigue est produite par les extensions et compressions alternatives du matériau, surtout dans les couches externes à la courroie.

Cet essai n'est cependant pas essentiel pour les courroies destinées au fond. Celles-ci ne sont pas prévues pour des efforts de traction très élevés et, en conséquence, leur épaisseur est assez faible. Aussi les contraintes apparaissant lors du passage sur les tambours ne sont-elles, en général, pas critiques au point de vue de la durée de service des courroies, même en tenant compte des faibles diamètres des tambours couramment employés au fond.

Pour les convoyeurs de surface par contre qui atteignent des longueurs considérables, on est amené à des épaisseurs de courroie beaucoup plus importantes. Avec de pareilles épaisseurs, les contraintes produites par l'impact des produits sur la bande n'ont plus l'importance qu'elles ont dans le fond, la résistance des courroies étant surabondante au point de vue des sollicitations par choc. Par contre, la flexion sur les tambours devient un point critique : on peut endommager sérieusement une bande épaisse en la faisant passer sur des tambours trop petits.

Au point de vue construction, il est cependant intéressant de réduire les diamètres de tambours (poids, encombrement). Il serait donc utile de pouvoir déterminer, au moyen d'un essai de flexion alternée, l'influence du diamètre des tambours sur la durée de vie d'une courroie épaisse.

Cependant, comme cet essai n'intéresse pas directement le fond, on ne s'y attardera pas ici. Signalons cependant une faute à éviter. On pourrait être tenté d'accélérer cet essai de fatigue en faisant passer la courroie sur des tambours de diamètre notablement plus faible que celui pour lequel elle est prévue. Cette façon de procéder rendrait très difficile la détermination d'un facteur de proportionnalité permettant de comparer les résultats de l'essai au comportement à prévoir en service réel. D'autre part, il

faudra éviter de travailler avec des échantillons trop étroits : les effets de bord fausseraient les résultats.

Enfin, un essai de fatigue de ce genre ne pourra être admis que si, après avoir soumis l'échantillon à un certain nombre de flexions alternées, on lui fait subir des essais statiques pour déterminer la variation de ses propriétés mécaniques.

4) Traction pulsée.

Il est intéressant de savoir dans quelle mesure les allongements (mesurés sur des échantillons neufs lors de l'essai statique de traction) sont élastiques, c'est-à-dire dans quelle mesure la courroie est encore capable de subir ces allongements après un certain temps de service.

On a construit à cet effet un « élastomètre » réalisant des tractions pulsées. Cet essai ressemble aux essais d'hystérésis effectués antérieurement avec la machine de l'essai de traction statique

Une éprouvette est soumise à une tension de base constante par un dynamomètre à ressort à réglage automatique. Un excentrique réglable superpose à cette tension de base une charge pulsatoire.

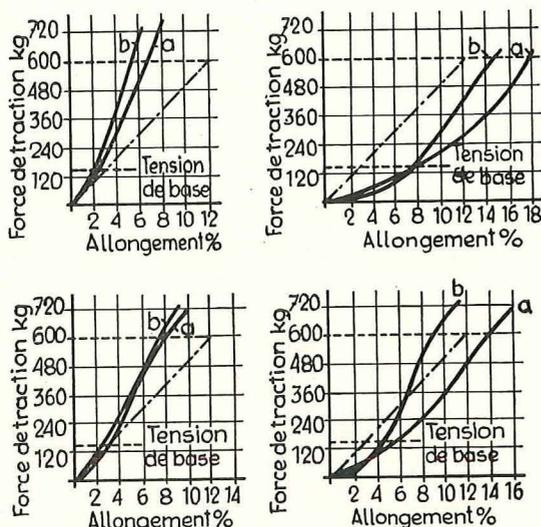


Fig. 8. — Caractéristique allongement-tension.

Largeur des éprouvettes : 20 mm

Tension de base pour l'essai de tension pulsatoire : 15 kg/cm par pli (correspond à 5 % d'allongement pour une courroie idéale).

L'excentrique produisant la tension ondulatoire est réglé de façon à produire une tension maxima de 30 kg/cm par pli (6 % d'allongement) dans une courroie normale.

Nombre de cycles : 1000

Trait de chaînette : Bande idéale (parfaitement élastique) - Résistance 60 kg/cm par pli - Allongement à la rupture : 12 %.
a : Caractéristique avant l'essai de fatigue par tension pulsatoire.
b : Caractéristique après l'essai de fatigue par tension pulsatoire.

Le diagramme fig. 8 donne les courbes allongement-tension, relevées sur les échantillons III, IV, V et VI au moyen de la machine normalisée pour l'essai statique. Les courbes marquées (a) se rapportent aux échantillons neufs, les courbes (b) aux

échantillons ayant subi préalablement 1000 pulsations sur l'élastomètre. Pour chaque sorte de courroie, la courbe (b) (échantillon fatigué) est plus plate à son point de départ que celle (a) de l'échantillon neuf mais ensuite elle se redresse et devient plus raide. En effet, la charge pulsée a pour effet d'étirer les âmes textiles. Le caoutchouc garde son élasticité et, à la suppression de la charge, tend à contracter la courroie. Lors de l'essai de traction subséquent (il suffit d'une force assez faible pour étirer le caoutchouc), les toiles n'interviennent qu'après un certain allongement. A partir de ce moment, la courbe se raidit, la résistance des toiles, qui ont perdu une partie de leur souplesse, s'ajoutant à celle du caoutchouc.

En service réel, les courroies restent toujours plus ou moins tendues et le caoutchouc n'a pas la possibilité de se contracter. En traçant la tangente à la partie redressée de la courbe, on détermine sur l'axe des abscisses un point à partir duquel on peut mesurer les allongements pratiquement disponibles.

De la fig. 8 résulte qu'à la suite de l'essai de traction pulsatoire, l'allongement élastique effectif en service diminue beaucoup plus pour les courroies à fort allongement initial que pour les autres.

C. — Arrachement au démarrage.

1. Considérations générales.

Quand une courroie démarre, le brin qui s'engage sur la tête motrice est soumis à une traction momentanée qui, selon les caractéristiques du moteur, peut dépasser de 50 %, ou plus encore, l'effort sur la bande en marche normale.

Cette traction s'établit en 0,05... 0,10 seconde. Il est important de savoir quelle est, à cette vitesse d'arrachement, la résistance à la traction, aussi bien pour la courroie neuve qu'après un certain temps de service.

L'essai par choc en traction avec le mouton à pendule ne permet pas de tirer des conclusions à ce point de vue car il est beaucoup trop rapide (0,005 sec.)

D'autre part, cet essai ne permet pas la mesure des efforts, mais uniquement celle du travail absorbé, et il faudrait compliquer beaucoup l'appareillage pour l'adapter à ce nouvel objectif.

2. La machine pour arrachement « naturel ».

On a construit une machine simulant assez exactement le processus d'arrachement au démarrage. L'arrachement dure de 0,8 à 1 sec. et est réalisé de la façon suivante.

Un volant est mis en vitesse par un moteur, puis débrayé quand il atteint 1400 à 2800 tours par minute, il est accouplé magnétiquement à une vis sans fin entraînant l'une des mâchoires de fixation de l'échantillon. L'autre mâchoire est reliée à un dynamomètre. L'appareil enregistre simultanément l'effort exercé et l'allongement de l'éprouvette (deux repères à 100 mm d'intervalle) en fonction du temps.

Selon la qualité et le mode de fabrication des courroies, la résistance à la rupture, mesurée au

moyen de cet appareil, dépasse de 0 à 15 % les chiffres relevés à l'essai statique (30 mm/min). L'allongement diminue de 10 % par rapport à l'essai statique.

3. *Domaine d'emploi.*

Cet appareil se prête particulièrement aux études de qualité des fabricants. On peut aussi fort utilement l'utiliser pour l'essai d'échantillons soumis auparavant à l'essai de fatigue par flexion alternée et se faire ainsi une idée de la fatigue par flexion assez proche de la réalité.

D. — La flexibilité.

1. *Méthodes statiques.*

La flexibilité doit avoir sa place dans une étude d'ensemble des qualités d'une courroie. La première idée qui vient à l'esprit consiste à exécuter une mesure statique, en chargeant en son milieu, au moyen de poids ou de dynamomètres, un échantillon posé sur deux supports et en relevant la flèche en fonction de la charge. On peut alors soit se donner la flèche correspondant à un diamètre de tambour déterminé et chercher la charge correspondante, soit partir d'une charge normalisée et déterminer la flèche. On peut découper les éprouvettes longitudinalement ou transversalement. Dans le premier cas, il s'agira de la souplesse pour le passage sur les tambours, dans le second de la flexion en auge. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne tient pas compte de l'influence du temps (vitesse de flexion).

2. *Oscillographe à pendule.*

C'est pour ces raisons qu'on a mis au point un procédé pour étudier le processus de flexion pendant le mouvement (essai dynamique) : on suspend l'éprouvette verticalement et on y fixe un pendule à tige. Celui-ci est écarté de sa position d'équilibre, puis abandonné à lui-même. L'oscillation, fortement amortie par l'échantillon, est enregistrée sur une bande de papier par un crayon fixé à l'extrémité mobile de l'éprouvette.

Oscillographe à pendule

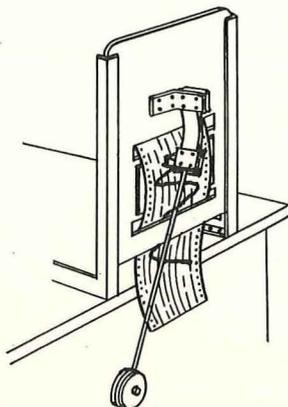


Fig. 9. — Oscillographe à pendule.

La connaissance en fonction du temps, de l'amortissement et de la fréquence des oscillations permet de départager l'influence des phénomènes élastiques et des frottements dans la raideur des courroies. Aux déformations élastiques correspond un travail réversible. Plus la raideur « élastique » est élevée, plus il faut augmenter les diamètres de tambour et diminuer l'angle de flexion en auge.

Les constructeurs de transporteurs demandent souvent aux fabricants de courroies de leur fournir le module d'élasticité (E). Celui-ci dépend du degré de déformation. De plus, les déformations plastiques font dépendre ce module du temps. La détermination directe (à partir d'un diagramme de traction) a donc peu de sens. On peut fort bien, par contre, tabler sur les valeurs de E, calculées à partir de l'oscillogramme du pendule.

Pendant une oscillation, l'éprouvette prend des courbures sans cesse variables. De la valeur effective de l'amortissement, on peut donc déduire le travail nécessaire pour le passage sur des tambours de diamètres variés. Ces valeurs sont assez proches de la réalité car la durée des oscillations du pendule est du même ordre de grandeur que celle du passage de la courroie sur le tambour.

E. — Essai de résistance à la flamme (1).

1. *Essai de durée de combustion.*

La fig. 10 montre la disposition d'un échantillon dans la flamme d'un brûleur ainsi que le réglage

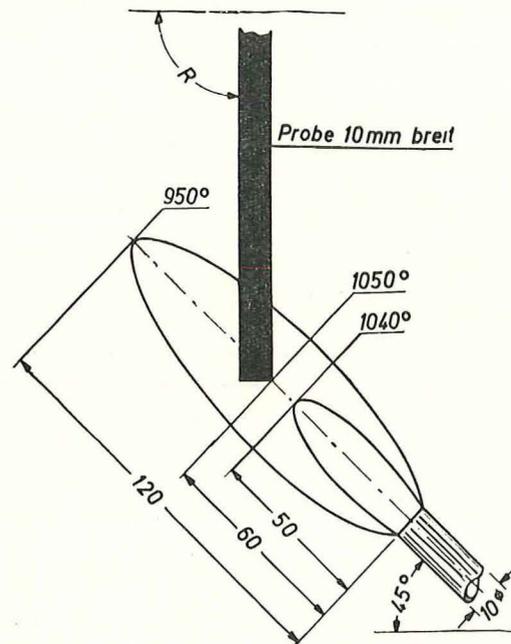


Fig. 10. — Essai normalisé de résistance au feu. Probe 10 mm breit : Largeur de l'échantillon 10 mm

(1) L'auteur fait remarquer que le mot allemand « flammwidrig » ne signifie pas « ininflammable » mais « qui étouffe la flamme », c.-à-d. ayant tendance à s'éteindre par soi-même après avoir été mis en feu.

de celui-ci. On peut faire usage de gaz de ville ou de propane (en bouteilles).

Les échantillons ont 200 mm de longueur et 10 mm de largeur. L'essai porte sur le revêtement de caoutchouc, sur les âmes textiles et sur l'ensemble. Pour chaque cas, on soumet trois éprouvettes à l'essai. Celles du revêtement sont maintenues 15 sec dans la flamme, celles qui contiennent du textile y restent 30 sec.

On chronomètre le temps pendant lequel chaque éprouvette continue à brûler après avoir été retirée de la flamme et on fait la somme des neuf temps obtenus. Selon le total obtenu, on distingue quatre classes de courroies :

jusqu'à 60 sec.	classe 1
de 61 à 120 sec.	classe 2
de 121 à 180 sec.	classe 3
de 181 à 240 sec.	classe 4

2. Essai d'inflammation.

La méthode décrite ci-dessus ne permet pas d'observer avec précision l'instant de l'inflammation. D'autre part, l'atmosphère de la flamme est réductrice. On a donc mis au point un autre procédé, où l'échantillon n'est pas enveloppé par une flamme mais placé à l'extrémité d'une petite cheminée incandescente traversée par un courant d'air chaud ayant une teneur normale en oxygène.

L'échantillon est un cercle de 20 mm de diamètre découpé dans la courroie. Quand il a pris feu, on le retire et on chronomètre la durée de la combustion.

Ce brûleur, chauffé par résistance électrique, a été mis au point par la firme Horo et est fabriqué et mis en vente par la firme Desag de Heidelberg (fig. 11). La figure donne la répartition de la température le long de l'axe de la cheminée. Cette température est homogénéisée par une spirale métallique.

* * *

Discussion.

M. ANDRIEN. — L'appareillage que vous venez de décrire, peut-on se le procurer dans le commerce, par exemple chez Scott et Schopper.

M. BERNHARDT. — Les fabricants fabriquent eux-mêmes ces appareils.

M. de CROMBRUGGHE. — Les résultats des essais à chocs répétés étaient-ils reproductibles et avait-on beaucoup de dispersion dans les résultats ?

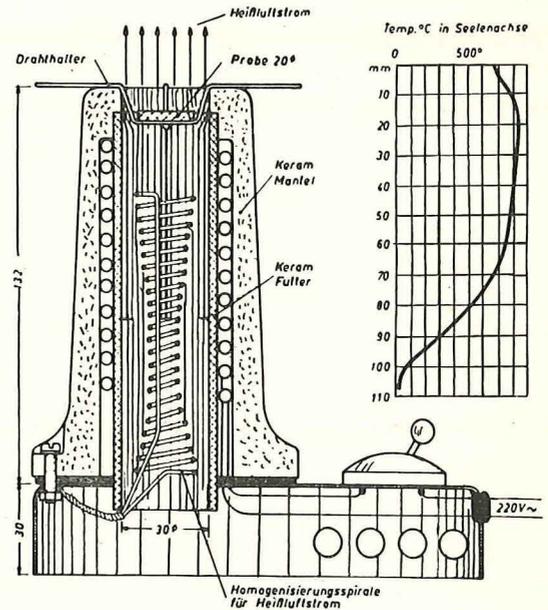


Fig. 11. — Nouveau dispositif pour l'essai de résistance au feu.

Heißluftstrom	= courant d'air chaud
Drahthalter	= support en fil de fer
Probe 20 Ø	= éprouvette Ø 20
Temp. ° C in Seelenachse	= Température en ° C dans l'axe de l'appareil
Keram. Mantel	= enveloppe en céramique extérieure
Keram. Futter	= enveloppe en céramique intérieure
Homogenisierungsspirale für Heißluftstrom	= spirale d'homogénéisation de la température.

M. BERNHARDT. — Un même morceau de courroie subit une dispersion de l'ordre de 5 à 10 %, mais il peut arriver que les échantillons montrent des écarts plus grands; ainsi ce fut le cas pour une courroie en chlorure de polyvinyle. Dès lors, on constate qu'il doit y avoir des hétérogénéités dans la fabrication. Ainsi la forme de la cassure est différente car, en effet, un morceau de courroie qui subit un grand nombre de coups casse pour finir en s'effilochant, tandis qu'une courroie qui subit un petit nombre de coups casse d'une façon plus nette.

Je veux bien mettre à la disposition des fabricants de caoutchouc les plans et les appareils que j'ai conçus moi-même.