

REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

J. LESAVRE

Étude du phénomène de choc. Cas particulier du LUCOFLEX dans sa zone de transition

Revue de statistique appliquée, tome 3, n° 4 (1955), p. 7-25

http://www.numdam.org/item?id=RSA_1955__3_4_7_0

© Société française de statistique, 1955, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « *Revue de statistique appliquée* » (<http://www.sfds.asso.fr/publicat/rsa.htm>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE DE CHOC

Cas. particulier du LUCOFLEX dans sa zone de transition ⁽¹⁾

par

J. LESAVRE

*Ancien Elève de l'École Polytechnique
Ingénieur de Recherches au Centre de la Croix-de-Berny
Compagnie de St-Gobain*

La Compagnie de Saint-Gobain, Chauny, Cirey a créé en 1952 un Centre de Recherches pour suivre, contrôler et développer ses fabrications de chimie minérale et organique.

Parmi les produits organiques commercialisés par Saint-Gobain, se trouve le LUCOFLEX, polychlorure de vinyle pur, sans plastifiant, qui présentait un comportement singulier au choc. M. Lesavre a été chargé d'étudier ce problème : il a su le résoudre en s'appuyant sur des méthodes statistiques simples.

Au cours de son étude, M. Lesavre s'est vu obligé d'introduire deux nouvelles grandeurs: la fragilité et l'impactance, qui facilitent la compréhension du phénomène de choc. Bien que cette étude ne concerne qu'un seul produit, il nous paraît vraisemblable que toutes les matières plastiques homogènes ont un comportement analogue.

BUT DE L'ÉTUDE - INTRODUCTION

L'essai de choc est un essai simple, et nous espérons contrôler industriellement la qualité d'un LUCOFLEX par un essai au MOUTON-PENDULE CHARPY.

Cet essai est bien connu des métallurgistes : un mouton-pendule tombe d'une certaine hauteur sur des barreaux reposant sur deux appuis. L'angle de remontée du pendule, après le choc, permet de connaître l'énergie absorbée. Ce travail de rupture est rapporté à la section droite du barreau brisé, ce qui définit la **résilience**.

En fait, à + 25°C, les choses se compliquent tout de suite : certaines éprouvettes cassent en absorbant une énergie très faible, et d'autres ne cassent pas mais se déforment, passent entre les appuis et encaissent une énergie considérable. Il paraît parfaitement légitime de penser que le phénomène de choc est double, suivant que l'éprouvette casse ou résiste.

Le but premier de notre étude était donc la caractérisation de ce phénomène bimodal : nous voulions savoir comment variaient les proportions des éprouvettes présentant tel ou tel type de rupture, en fonction de la température, de la distance des appuis, de l'épaisseur de l'éprouvette, etc...

En second lieu nous voulions essayer de caractériser par un chiffre de résilience la rupture vitreuse et la pseudo-rupture résistante. Les chiffres moyens de résilience, et leur dispersion, nous auraient permis - pensions-nous - de fixer

(1) Exposé présenté au cours des Journées d'Etudes et de discussion des anciens stagiaires du Centre de Formation (5, 6 et 7 mai 1955)

des normes de contrôle (livraison et réception). En réalité, nous nous sommes aperçus que la résilience n'avait pas de sens physique et qu'il fallait :

- 1) dans le cas de la rupture franche la diviser par la distance des appuis,
- 2) dans le cas de la pseudo-rupture, la diviser par l'épaisseur de l'éprouvette.

On obtient ainsi des valeurs de "fragilité" et d' "impactance", qui doivent bien donner la valeur du LUCOFLEX, si on veut le comparer à d'autres matières plastiques, mais qui ne permettent pratiquement pas de distinguer un bon d'un mauvais LUCOFLEX. Fragilité et impactance sont donc des invariants (ou à peu près) du LUCOFLEX, et seuls les pourcentages relatifs d'éprouvettes ayant présenté l'un ou l'autre type de rupture renseignent en fin de compte sur la qualité du produit.

PLAN

Nous allons tout d'abord justifier ces nouvelles notions de fragilité et d'impactance, puis nous nous pencherons sur la bimodalité du phénomène, ce qui nous conduira aux déterminations déjà classiques des températures de fragilité, de transition et de sécurité.

MATIÈRES PREMIÈRES

Le LUCOFLEX utilisé pour ces essais de choc était de la production courante de l'usine de Montluçon, du dernier trimestre 1954. Grosso modo nous avons fait choix des épaisseurs suivantes : 3,2 - 4,2 - 5,8 - 7,6 et 10,8 mm.

Les barreaux étaient sciés à la scie à ruban et non retouchés. Ils étaient sans entaille et avaient une largeur (hauteur) uniforme de 15 mm.

Nous avons fait varier la distance des appuis : d mais nous nous sommes fixés d'avoir toujours un excès de longueur de 20 mm de chaque côté des appuis. Ainsi nous avons des éprouvettes de longueur $L = d + 40$ mm.

En général notre unité de mesures était un ensemble de 20 barreaux - quelquefois 12 seulement.

MOUTON - PENDULE

Nous avons fait des essais à 5 températures qui nous avaient paru couvrir la zone de transition du LUCOFLEX, savoir : -16°C , 0°C , $+15^{\circ}\text{C}$, $+25^{\circ}\text{C}$ et $+40^{\circ}\text{C}$.

Nous n'avons pas pu utiliser le même mouton-pendule pour les cinq températures, mais cela ne s'est pas révélé catastrophique.

A -16°C , nous avons utilisé un mouton-pendule Charpy, de la Maison TRAYVOU, de puissance 0,5 ou 1,0 kgm. Ce mouton-pendule est classique pour les essais au choc des matières plastiques (Norme française NF C 46 Février 1952 - E - Résistance aux chocs, pp. 21, 22 et 23).

Une modification cependant nous permettait de rendre la distance des appuis variable entre 21,5 et 70 mm. Les essais à -16°C ont été réalisés à l'intérieur d'une chambre froide, donc dans l'air.

Aux quatre autres températures, nous avons utilisé un mouton-pendule Charpy, de la maison TRAYVOU, de puissance 10 kgm. Ce mouton-pendule a été fait spécialement pour la Société Saint-Gobain, dans le but de contrôler précisément le LUCOFLEX. A la puissance près, il est identique au mouton-pendule de 30 kgm, bien connu des métallurgistes.

Une modification permettait également de rendre variable la distance des appuis entre 27 et 70 mm.

A 0°C et à + 40°C, les barreaux étaient vivement retirés d'un bac d'eau à ces températures, portés sur les appuis et cassés. La chaleur spécifique élevée et la faible conductibilité calorifique du produit autorisent l'emploi d'une telle méthode. Auparavant les éprouvettes étaient restées une huitaine de jours dans une chambre froide à 0°C ou dans une étuve à + 40°C et ce n'est qu'au moment de la mesure qu'on les immergeait passagèrement dans l'eau.

A + 15°C et à + 25°C, les essais ont été faits dans l'air, à la température de la pièce.

MESURES

Les barreaux étaient numérotés et rangés, ce qui nous avait permis de mesurer à l'avance leurs dimensions (épaisseur, largeur). Nous avons pu opérer très rapidement - 360 éprouvettes en 3 heures - ce qui a dû diminuer les risques d'erreurs accidentelles.

EXPRESSION DES RÉSULTATS

Des essais préliminaires avaient justifié, à + 25°C, l'emploi de l'impactance comme quotient du travail absorbé dans la pseudo-rupture, par le produit de la hauteur par le carré de l'épaisseur, soit :

$$I = \frac{W}{bh^2}$$

W = travail absorbé par le choc - en kgcm

b = largeur en cm - en principe 1,5 cm

h = épaisseur du barreau en cm - de 0,3 à 1,1 cm

Ainsi exprimée l'impactance est le rapport d'un travail par un volume, ce qui est logique, et elle s'exprime très simplement comme une pression, ou une résistance à la traction en kg/cm².

Nous n'avons pas voulu, bien que cela aurait été plus convaincant pour le lecteur, calculer la résilience pour chaque éprouvette, puis démontrer que la quantité intéressante pour nous était non la résilience mais son quotient par l'épaisseur du barreau. En effet, cette méthode nous aurait conduit à diviser une résilience moyenne, par une épaisseur moyenne, ce qui entraînait une imprécision supplémentaire. Aussi, pour tirer le maximum d'information de nos résultats nous avons calculé directement l'impactance, chose particulièrement facile, si on dispose d'une machine à calculer statistique qui fait simplement les élévations au carré.

Dans le cas de la rupture vraie, nous avons suivi la méthode logique, en calculant la résilience; il nous sera facile de montrer, au **moins aux basses températures**, qu'elle est à peu près proportionnelle à la distance des appuis. L'inconvénient signalé plus haut n'a plus d'influence, car la distance des appuis était connue avec une grande précision et surtout ne variait absolument pas au cours d'une série de mesures.

La résilience a pour expression $R = \frac{W}{bh}$, et la fragilité $F = \frac{W}{bhd}$ avec les mêmes symboles que ci-dessus.

DÉPOUILLEMENT STATISTIQUE DES RÉSULTATS

Nous étions pour chaque épaisseur et pour chaque distance d'appuis en possession d'un nombre de mesures d'impactance et de résilience dont le total atteignait 20.

Nous avons employé la méthode graphique connue sous le nom de droite de Henry, en utilisant des papiers à ordonnées galtoniennes. Mais il a été très remarquable de constater que :

- l'impactance est distribuée normalement

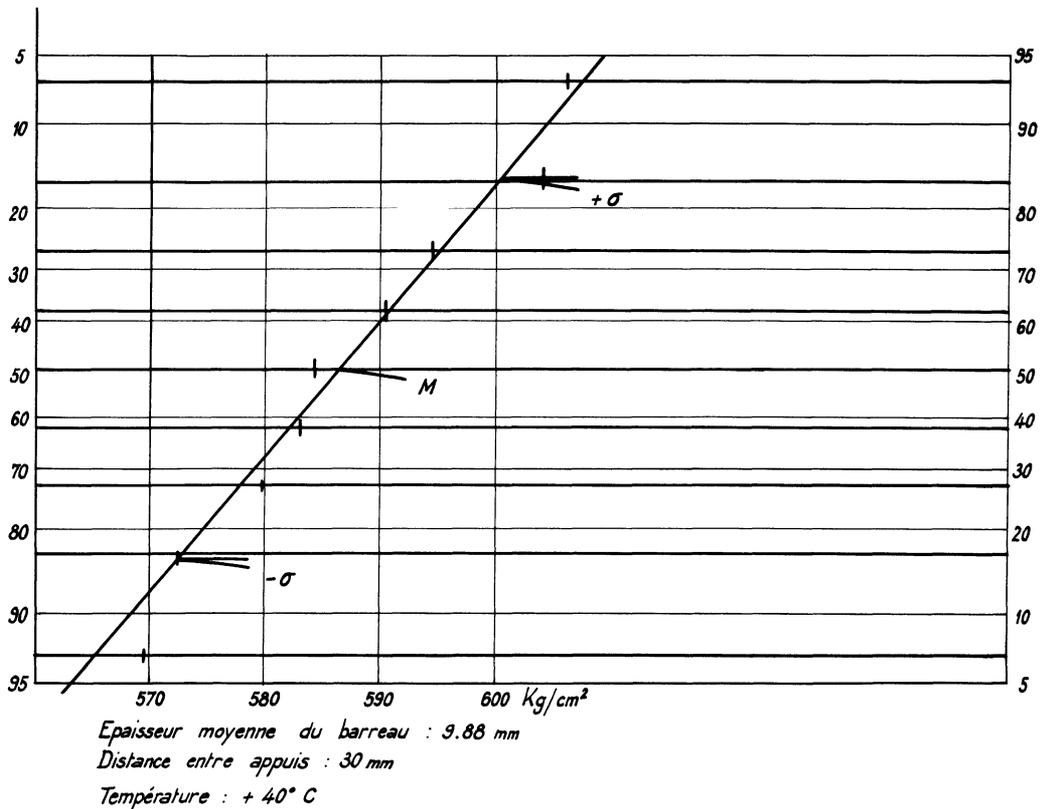
- la résilience ne l'est pas, mais son logarithme est distribué gaussien-ment. Nous avons donc eu recours à du calque gaussien-arithmétique pour l'impactance, et à du calque gaussien-logarithmique pour la résilience.

Bien entendu nous nous sommes contentés d'une droite de Henry tracée à vue, qui nous donnait par lecture directe une estimation de la moyenne et de l'écart-type. Cette estimation ne saurait satisfaire des statisticiens raffinés, mais elle a l'avantage de présenter pour nous, industriels, une précision suffisante pour un prix de revient infime, car ce travail peut être confié à... un manœuvre dégourdi ou à un dessinateur débutant. Il ne nécessite pas l'achat d'une machine à calculer onéreuse, mais seulement d'une liasse de calques galtoniens. Sur ces calques on peut figurer une fois pour toutes les niveaux auxquels doivent être portées les mesures successives, rangées par exemple, par ordre croissant. En portant au crayon les mesures, ainsi que la droite de Henry, on peut récupérer, en le gommant, son calque pour un autre dépouillement.

A titre d'exemple nous donnons le dépouillement

- de 9 mesures d'impactance - figure n° 1

$h = 9,88 \text{ mm}$ $d = 30 \text{ mm}$ $L = 70 \text{ mm}$
température : + 40°C Mouton-pendule : 10 kgm



9 MESURES D'IMPACTANCE

Fig. n° 1 - Droite de Henry - Estimation de la moyenne et de l'écart-type

- de 13 mesures de résilience - figure n° 2

$h = 4,13 \text{ mm}$ $d = 55 \text{ mm}$ $L = 95 \text{ mm}$
température : 0°C Mouton-pendule : 10 kgm

Bien entendu ces exemples n'ont pas été choisis absolument au hasard, mais nous devons dire très franchement que, tout au long de cette étude, jamais le tracé à vue d'une droite de Henry ne nous a posé de cas de conscience.

Les résultats d'impactance sont donnés avec leur écart-type, les résultats de résilience sont donnés avec un chiffre entre crochets, en quelque sorte leur écart-type logarithmique. En multipliant la moyenne par ce chiffre on obtient le niveau $+\sigma$, en divisant la moyenne par ce chiffre on obtient le niveau $-\sigma$ (1).

Ces résultats sont exposés d'abord sous forme de tableaux, mais comme ces tableaux sont assez indigestes, les résultats sont également donnés sous forme de courbes, de graphiques, donnant l'impactance ou la résilience en fonction de la distance des appuis.

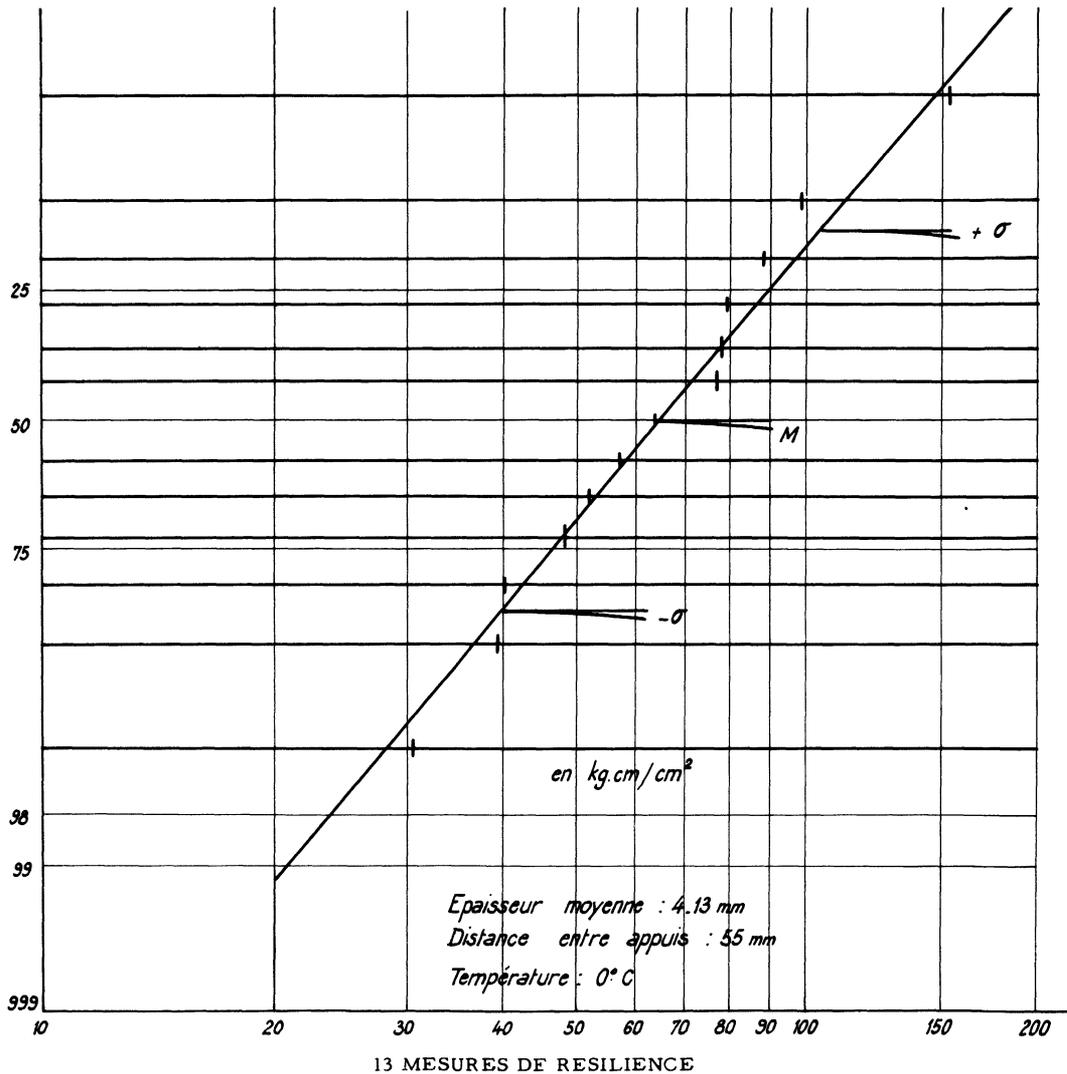


Fig. n° 2 - Droite de Henry - Estimation de la moyenne et de l'écart-type

(1) Dans les tableaux 3 à 10 ci-après, chaque case contient 4 nombres :

épaisseur en mm	<u>nombre d'éprouvettes ayant présenté ce type de rupture</u>
moyenne \pm écart-type	<u>nombre total d'éprouvettes testées</u>

(pour ce dernier, les nombres entre parenthèses correspondent aux écarts-types logarithmiques).

TABLEAUX DES RÉSULTATS

Le tableau n° 1 - **Impactance à -16° C** - n'existe pas, car le mouton-pendule de 1 kgm était trop faible pour faire passer les éprouvettes entre les appuis (sauf celles de 3 mm).

Le tableau n° 2 - **Impactance à 0° C** - n'existe à peu près pas, car à cette température le LUCOFLEX est fragile et les pseudo-ruptures impactantes sont rares (13 sur 360)

d en mm	h en mm	I en kg/cm ²	Ecart-type	Nombre
50	5,74	608		1
60	5,82	555	± 5	5
55	4,12	548	± 13	7

Le tableau n° 3 - **Impactance à +15° C** - et

Le tableau n° 4 - **Impactance à +25° C** - n'appellent aucun commentaire.

Le tableau n° 5 - **Impactance à +40° C** - comporte une ligne supplémentaire, car nous avons pu faire la moyenne dans chaque colonne - ce qui revient à dire qu'à +40° C l'impactance devient une quantité indépendante de l'épaisseur du barreau, et qu'elle ne dépend plus que de la distance des appuis.

Le tableau n° 6 - **Résilience à -16° C**

Le tableau n° 7 - **Résilience à 0° C**

Le tableau n° 8 - **Résilience à +15° C**

Le tableau n° 9 - **Résilience à +25° C** et

le tableau n° 10 - **Résilience à +40° C**

n'appellent aucun commentaire spécial.

Toutefois, à la demande de M. BAZIN, nous avons dû préciser l'ordre de grandeur des coefficients de variation pour l'impactance et pour la fragilité.

Nous ne pouvons pas donner de vraies valeurs moyennes car il aurait fallu que chaque coefficient de variation soit établi par dépouillement statistique d'un même nombre de mesures - ce qui n'est pas notre cas.

Pour l'**impactance** les écarts se répartissent suivant une loi de X^2 - à quelques exceptions près déterminées par un test de Cochran, imprécis lui aussi en raison de l'incertitude du nombre de degrés de liberté.

A + 15° C	le coefficient de variation est :	1,83 %
A + 25° C	" "	: 1,90 %
A + 40° C	" "	: 2,58 %

Pour la **fragilité** les écarts (logarithmiques) suivent aussi une loi de X^2 . On arrive aux estimations suivantes du coefficient de variation :

- 16 °C	0° C	+ 15° C	+ 25° C	+ 40° C
1,52	1,45	1,59	1,71	1,73

En moyenne on trouve pour la fragilité : 1,60. Ce qui veut dire que cette mesure est la plus dispersée sur laquelle nous soyons jamais tombés. En effet, pour une valeur moyenne de 10 kgcm/cm³ on trouve

$$\begin{aligned} & \text{le niveau } + 2 \sigma \text{ à } 25,6 \text{ kgcm/cm}^3 \\ & \text{et le niveau } - 2 \sigma \text{ à } 3,9 \text{ kgcm/cm}^3 \end{aligned}$$

Le chiffre le plus élevé constaté dans une distribution expérimentale de 10 à 20 mesures peut être 6 fois plus fort que le plus faible, sans qu'il y ait là rien d'anormal.

Tableau n° 3. - IMPACTANCE à + 15°C en kg/cm²

Distance des appuis en mm						
28	33	40	50	55	60	70
h = 2,94 $\frac{16}{19}$ 578 ± 11		2,95 $\frac{20}{20}$ 591 ± 9	2,97 $\frac{20}{20}$ 500 ± 10			
h = 4,18 $\frac{9}{20}$ 586 ± 16		4,09 $\frac{11}{20}$ 601 ± 11		4,18 $\frac{17}{20}$ 500 ± 12		
h = 5,83 $\frac{5}{20}$ 565 ± 8		5,85 $\frac{7}{20}$ 582 ± 11	5,88 $\frac{15}{20}$ 554 ± 10		5,82 $\frac{18}{20}$ 508 ± 7	
h = 7,80 $\frac{1}{20}$ 559		7,67 $\frac{11}{20}$ 516 ± 32		7,70 $\frac{17}{20}$ 534 ± 9		7,65 $\frac{18}{20}$ 482 ± 7
	h = 10,80 $\frac{6}{20}$ 469 ± 34	10,79 $\frac{6}{20}$ 529 ± 23		10,78 $\frac{8}{20}$ 544 ± 10		10,86 $\frac{17}{20}$ 503 ± 14

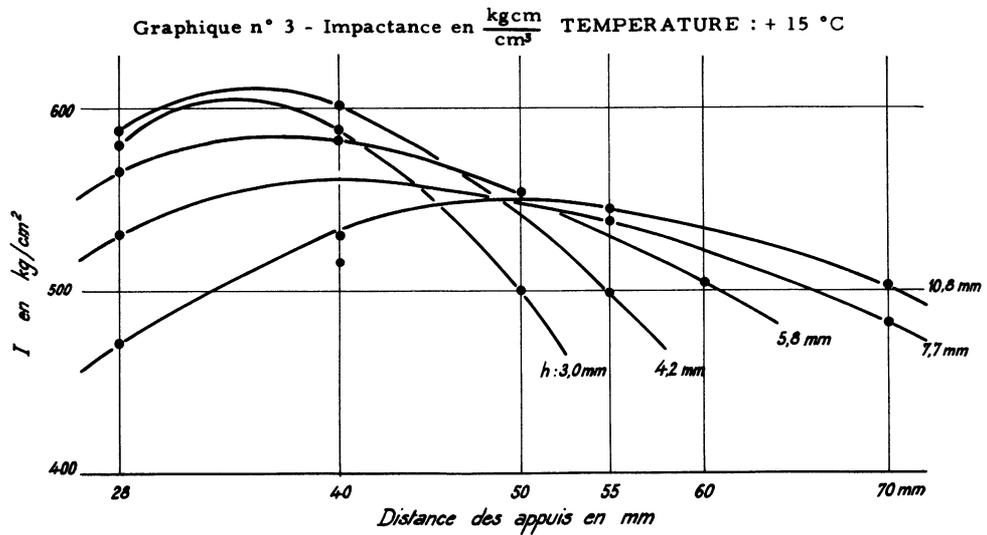


Tableau n° 4. - IMPACTANCE à + 25°C en kg/cm²

Distance des appuis en mm						
27	33	40	50	55	60	70
h = 3,19 $\frac{17}{20}$ 542 ± 15		3,21 $\frac{19}{20}$ 538 ± 12	3,22 $\frac{20}{20}$ 462 ± 18			
h = 4,18 $\frac{10}{20}$ 535 ± 9		4,17 $\frac{20}{20}$ 531 ± 8		4,15 $\frac{20}{20}$ 450 ± 10		
$\frac{0}{20}$		5,81 $\frac{10}{20}$ 532 ± 8	5,87 $\frac{12}{20}$ 496 ± 7		5,85 $\frac{19}{20}$ 452 ± 9	
h = 7,64 $\frac{2}{18}$ 521		7,64 $\frac{17}{20}$ 529 ± 21		7,59 $\frac{19}{20}$ 490 ± 9		7,54 $\frac{19}{20}$ 440 ± 8
	h = 10,86 $\frac{9}{20}$ 511 ± 8	10,88 $\frac{10}{20}$ 508 ± 13		10,81 $\frac{15}{20}$ 503 ± 22		10,80 $\frac{17}{20}$ 467 ± 9

Graphique n° 4 - Impactance en $\frac{\text{kgcm}}{\text{cm}^2}$ TEMPERATURE : + 25 °C

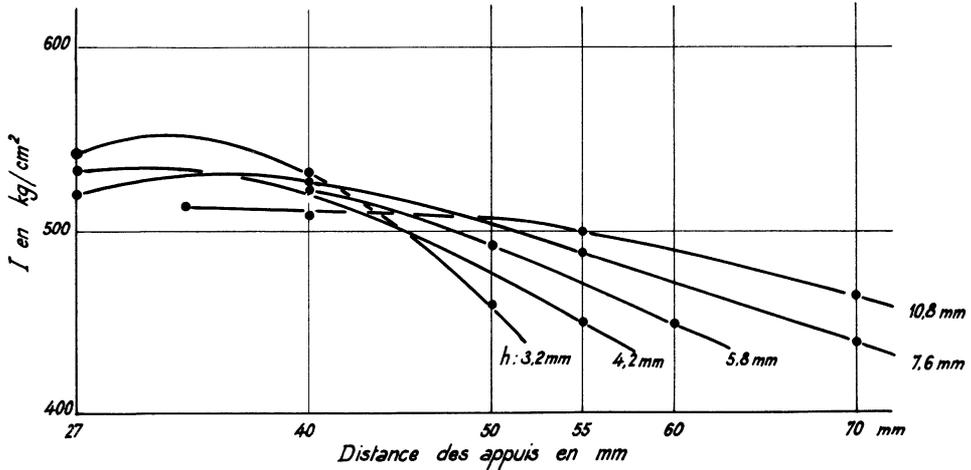


Tableau n° 5. - IMPACTANCE à + 40°C en kg/cm²

Distance des appuis en mm							
27	31	40	50	55	60	70	
h = 3,03 $\frac{16}{21}$ 542 ± 16	3,11 $\frac{18}{20}$ 538 ± 16	3,21 $\frac{18}{20}$ 487 ± 10	3,16 $\frac{20}{20}$ 424 ± 11				
h = 4,19 $\frac{8}{20}$ 523 ± 18	4,20 $\frac{14}{20}$ 526 ± 12	4,20 $\frac{20}{20}$ 497 ± 9		4,16 $\frac{18}{20}$ 418 ± 7			
$\frac{0}{11}$		5,42 $\frac{8}{20}$ 493 ± 11	5,30 $\frac{4}{20}$ 450		5,26 $\frac{13}{20}$ 412 ± 12		
	7,74 $\frac{14}{20}$ 514 ± 11	7,68 $\frac{17}{20}$ 482 ± 11		7,62 $\frac{14}{20}$ 429 ± 7		7,64 $\frac{18}{18}$ 379 ± 13	
	9,88 $\frac{9}{9}$ 586 ± 13	9,90 $\frac{3}{6}$ 499				9,85 $\frac{2}{2}$ 386	
	10,73 $\frac{3}{3}$ 548	10,83 473		10,81 $\frac{8}{12}$ 441 ± 14		10,84 $\frac{9}{10}$ 403 ± 16	
24 533	58 537	70 489	24 428	40 426	13 412	29 387	

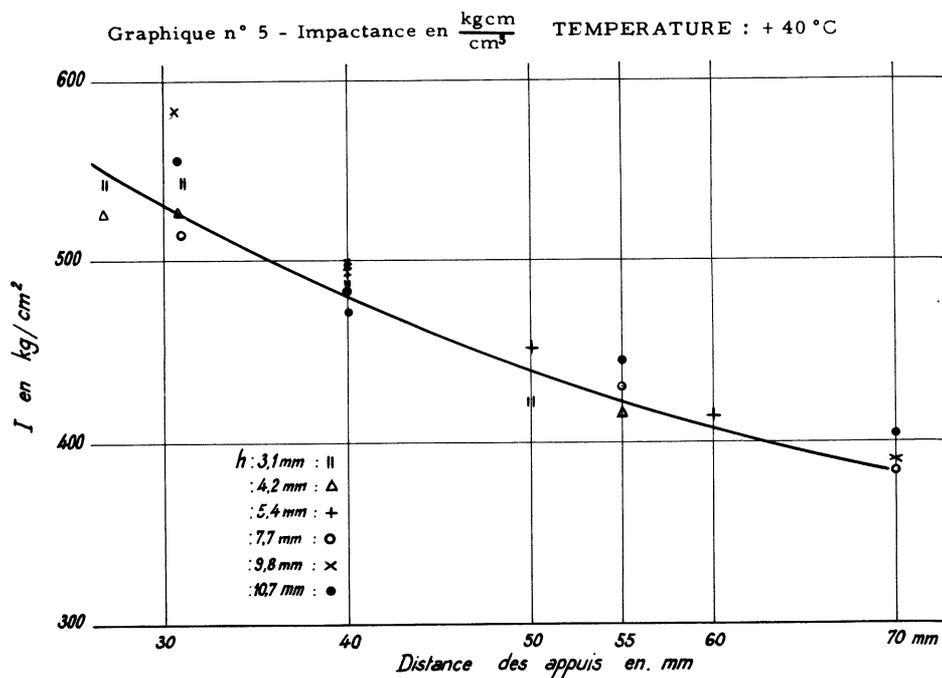


Tableau n° 6. - RESILIENCE à - 16°C en kgcm/cm²

Distance des appuis en mm						
21,5	30	40	50	55	60	70
3,05 $\frac{20}{20}$	3,14 $\frac{18}{20}$	3,28 $\frac{19}{20}$	3,23 $\frac{11}{20}$			
14,3 [1,52]	30,0 [1,73]	29,0 [1,52]	56,0 [1,66]			
4,20 $\frac{20}{20}$	4,23 $\frac{19}{20}$	4,21 $\frac{20}{20}$		4,18 $\frac{18}{20}$		
20,3 [1,43]	25,5 [1,61]	27,0 [1,80]		44,0 [1,59]		
	5,84 $\frac{20}{20}$	5,80 $\frac{20}{20}$	5,79 $\frac{17}{20}$		5,84 $\frac{17}{20}$	
	27,5 [1,38]	31,0 [1,50]	44,0 [1,45]		49,0 [1,63]	
	7,73 $\frac{18}{20}$	7,67 $\frac{14}{20}$				
	33,0 [1,24]	46,0 [1,28]				
40	75	73	28	18	17	= 251 épr.
17,0	28,8	31,6	48,4	44,0	49,0	

Graphique n° 6 - Résilience à - 16 °C d'où FRAGILITE = $\frac{R}{d} = 8,6 \text{ kgcm/cm}^3$

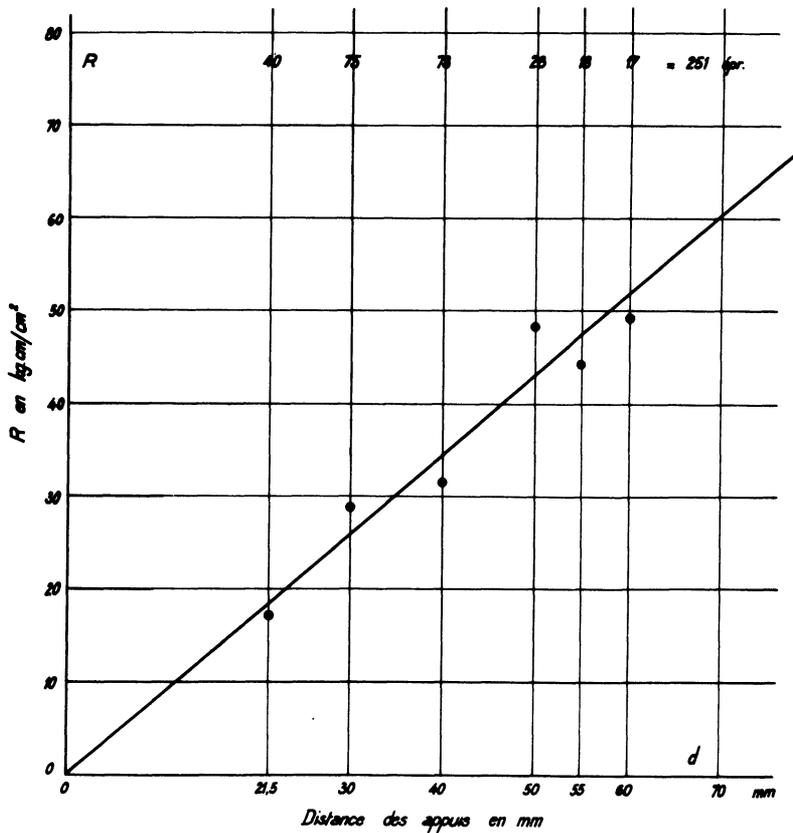


Tableau n° 7. - RESILIENCE à $\pm 0^{\circ}\text{C}$ en kgcm/cm^2

Distance des appuis en mm						
27		40	50	55	60	70
3,22 $\frac{20}{20}$		3,20 $\frac{20}{20}$	3,22 $\frac{20}{20}$			
20,0 [1,30]		34,5 [1,34]	50,0 [1,62]			
4,16 $\frac{20}{20}$		4,14 $\frac{20}{20}$		4,13 $\frac{13}{20}$		
27,8 [1,37]		33,0 [1,55]		65,0 [1,72]		
5,83 $\frac{20}{20}$		5,84 $\frac{20}{20}$	5,82 $\frac{19}{20}$		5,84 $\frac{15}{20}$	
21,0 [1,40]		33,3 [1,44]	48,0 [1,46]		53,5 [1,53]	
7,57 $\frac{20}{20}$		7,61 $\frac{20}{20}$		7,62 $\frac{20}{20}$		7,59 $\frac{20}{20}$
25,2 [1,48]		37,0 [1,46]		49,0 [1,29]		58,0 [1,53]
10,69 $\frac{20}{20}$		10,67 $\frac{20}{20}$		10,72 $\frac{20}{20}$		10,60 $\frac{20}{20}$
39,5 [1,27]		35,5 [1,34]		42,0 [1,47]		56,5 [1,50]
100		100	39	53	15	40
25,9		34,6	49,0	51,2	53,5	57,2

Graphique n° 7 - Résilience à 0°C d'où $\text{FRAGILITE} = \frac{R}{d} = 9,0 \text{ kgcm}/\text{cm}^3$

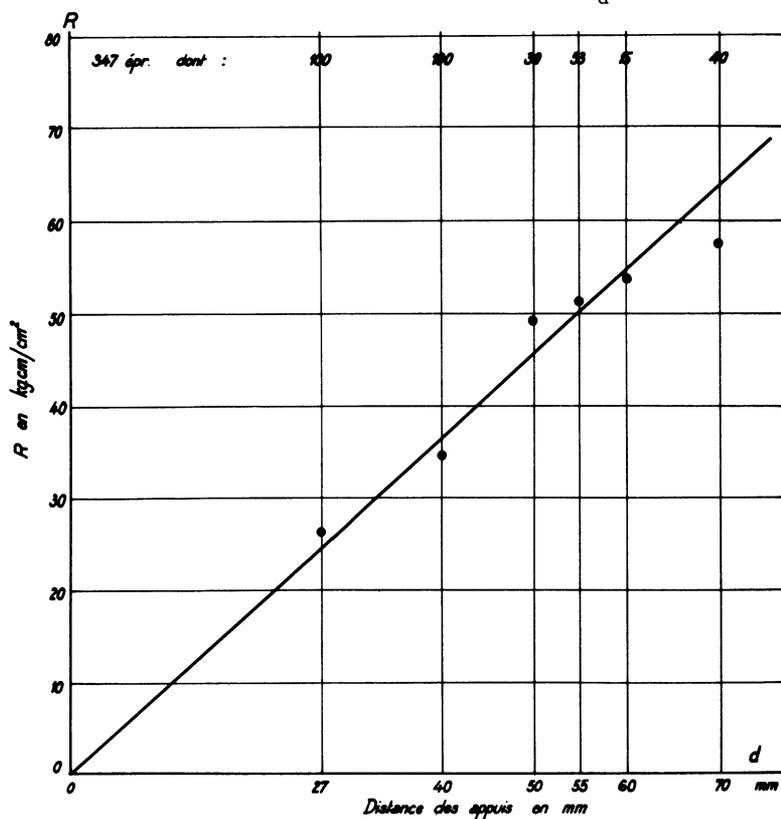


Tableau n° 8. - RESILIENCE à + 15°C en kgcm/cm²

Distance des appuis en mm						
28	33	40	50	55	60	70
2,95 $\frac{3}{19}$ 30,0 [1,50]		$\frac{0}{20}$	$\frac{0}{20}$			
4,18 $\frac{11}{20}$ 35,5 [1,32]		4,15 $\frac{9}{20}$ 52,0 [1,62]		4,15 $\frac{1}{20}$ 39,9		
5,84 $\frac{15}{20}$ 36,0 [1,56]		5,83 $\frac{13}{20}$ 50,0 [1,66]	5,85 $\frac{5}{20}$ 59,0 [1,23]		5,76 $\frac{2}{20}$ 64,0 [1,42]	
7,68 $\frac{19}{20}$ 62,0 [1,65]		7,66 $\frac{9}{20}$ 77,0 [1,56]		7,66 $\frac{3}{20}$ 84,0 [2,02]		7,63 $\frac{2}{20}$ 46,0 [1,63]
	10,91 $\frac{14}{20}$ 62,0 [1,60]	10,90 $\frac{14}{20}$ 63,0 [1,52]		10,89 $\frac{12}{20}$ 78,0 [2,18]		10,94 $\frac{3}{20}$ 77,5 [1,35]
48 44,0	14 62,0	45 59,0	5 59,0	16 75,8	2 64,0	5 62,9

Graphique n° 8 - Résilience à + 15°C d'où FRAGILITE = $\frac{R}{d} = 14,5 \text{ kgcm/cm}^3$

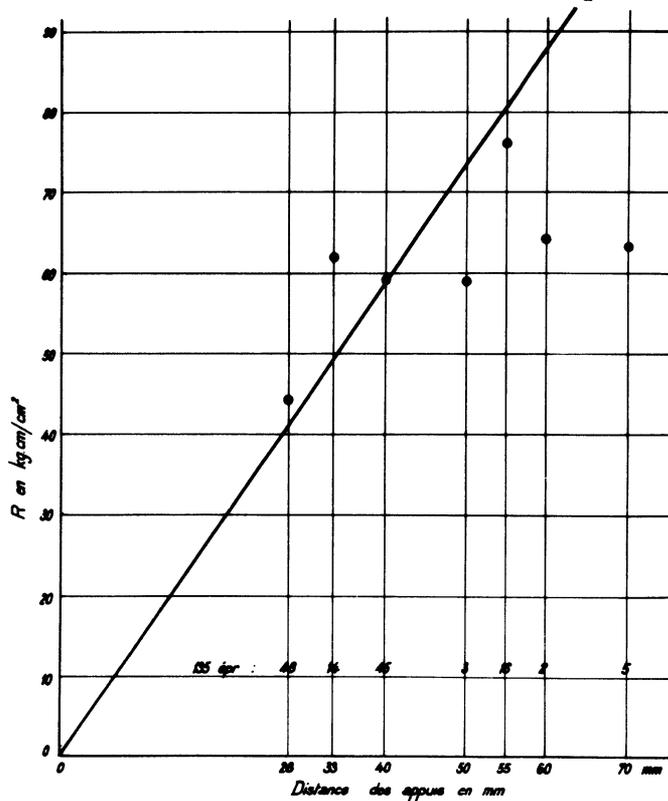


Tableau n° 9. - RESILIENCE à + 25°C en kgcm/cm²

Distance des appuis en mm						
27	33	40	50	55	60	70
h = 3,17 $\frac{3}{20}$ 29,0 [1,59]		3,12 $\frac{1}{20}$ 40,7	$\frac{0}{20}$	$\frac{0}{20}$		
h = 4,21 $\frac{10}{20}$ 33,5 [1,52]		$\frac{0}{20}$	$\frac{0}{20}$	$\frac{0}{20}$		
5,84 $\frac{20}{20}$ 34,5 [1,59]		5,83 $\frac{10}{20}$ 53,0 [2,12]	5,90 $\frac{8}{20}$ 40,5 [1,24]		5,88 $\frac{1}{20}$ 46,0	
7,55 $\frac{16}{18}$ 58,0 [1,76]		7,50 $\frac{3}{20}$ 59,0 [1,47]		7,60 $\frac{1}{20}$ 73,0		7,56 $\frac{1}{20}$ 68,2
	10,84 $\frac{11}{20}$ 44,0 [2,11]	10,77 $\frac{10}{20}$ 75,0 [1,67]		10,83 $\frac{5}{20}$ 60,0 [1,43]		10,83 $\frac{3}{20}$ 43,5 [2,30]
	50 40,5	11 44,0	24 61,4	8 40,5	5 62,0	1 46,0
						4 48,7

Graphique n° 9 - Résilience à + 25°C d'où FRAGILITE = $\frac{R}{d} = 13,1 \text{ kgcm/cm}^3$

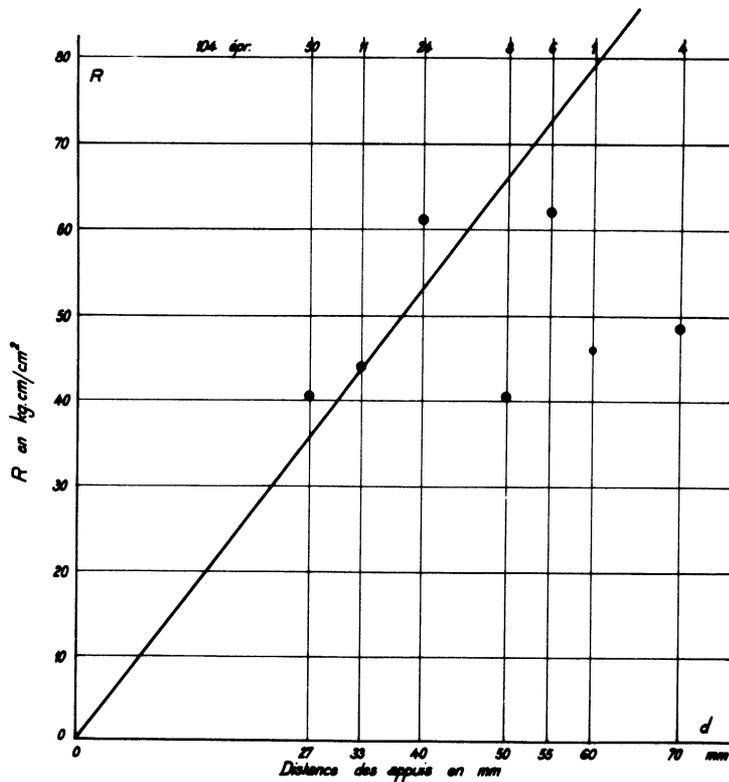


Tableau n° 10. - RESILIENCE à + 40°C en kgcm/cm²

Distance des appuis en mm						
27	31	40	50	55	60	70
3,07 $\frac{5}{21}$ 26,5 [1,66]	3,16 $\frac{2}{20}$ 27,5 [1,27]	3,42 $\frac{2}{20}$ 18,4				
4,21 $\frac{12}{20}$ 27,8 [1,37]	4,25 $\frac{8}{22}$ 35,5 [1,59]	$\frac{0}{20}$		4,20 $\frac{2}{20}$ 26,5 [1,34]		
5,39 $\frac{11}{11}$ 26,0 [1,69]		5,39 $\frac{12}{20}$ 24,5 [1,27]	5,41 $\frac{16}{20}$ 15,0 [1,60]		5,46 $\frac{7}{20}$ 35,0 [1,97]	
	7,68 $\frac{6}{20}$ 36,5 [1,81]	7,78 $\frac{3}{20}$ 60,0 [2,50]		7,62 $\frac{6}{20}$ 29,0 [1,31]		$\frac{0}{18}$
	$\frac{0}{9}$	9,83 $\frac{3}{6}$ 47,0 [3,40]				$\frac{0}{2}$
	$\frac{0}{3}$	10,95 $\frac{2}{6}$ 64,0 [1,39]		10,63 $\frac{4}{12}$ 43,0 [1,84]		11,08 $\frac{1}{10}$ 65,3
28 26,8	16 35,8	22 32,0	16 15,0	12 32,6	7 35,0	1 65,3

Graphique n° 10 - Résilience à + 40°C d'où FRAGILITE = $\frac{R}{d} = 7,3 \text{ kgcm/cm}^3$

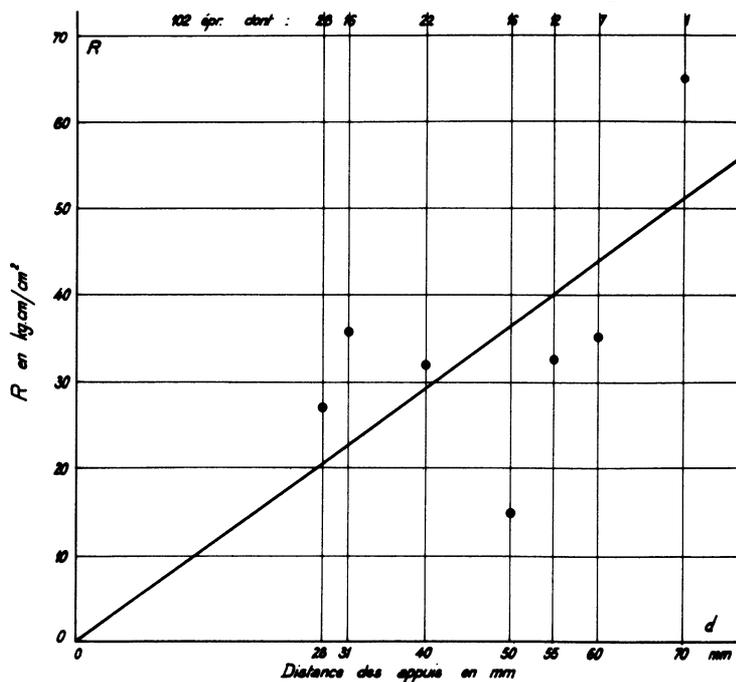


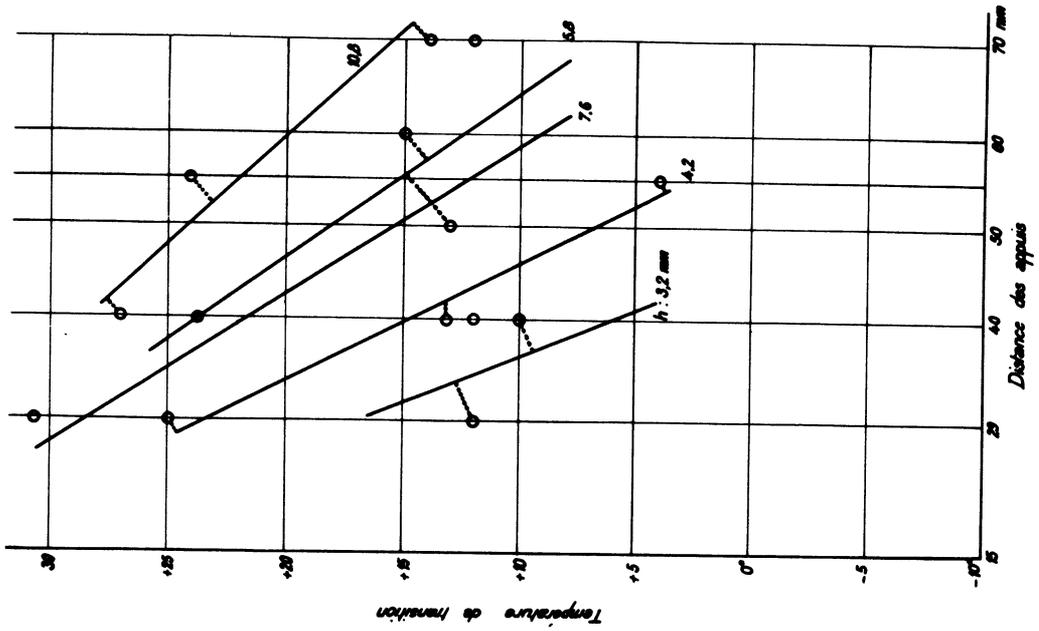
Tableau n° 11. - POURCENTAGE de RUPTURE FRAGILE

Epais- seur	Tempé- rature	Distance des appuis en mm					
		29	40	50	55	60	70
3,2 mm	- 16	90 %	95 %	55 %			
	0	100	100	100			
	+ 15	15	0	0			
	+ 25	15	5	0			
	+ 40	4,2	10	0			
4,2 mm	- 16	95	100		90		
	0	100	100		65		
	+ 15	55	45		5		
	+ 25	50	0		0		
	+ 40	50	0		10		
5,8 mm	- 16	100	100	85		85	
	0	100	100	95		75	
	+ 15	75	55	25		10	
	+ 25	100	50	40		5	
	+ 40						
7,6 mm	- 16	90	70				
	0	100	100		100		100
	+ 15	95	45		15		10
	+ 25	85	15		5		5
	+ 40	30	15		30		0
10,8 mm	- 16						
	0	100	100		100		100
	+ 15	70	70		60		15
	+ 25	55	50		25		15
	+ 40		33		33		8

Tableau n° 12. - TEMPERATURE de TRANSITION

Epais- seur	Tempé- rature	Distance des appuis en mm					
		29	40	50	55	60	70
3,2 mm	sécur.	+ 33	+ 38				
	trans.	+ 12	+ 10				
	frag.	- 9	- 18				
4,2 mm	sécur.	+ 62	+ 40		+ 30		
	trans.	+ 25	+ 13		+ 4		
	frag.	- 12	- 14		- 22		
5,8 mm	sécur.		+ 77	+ 41		+ 39	
	trans.		+ 25	+ 13		+ 15	
	frag.		- 21	- 15		- 9	
7,6 mm	sécur.	+ 63	+ 52				+ 26
	trans.	+ 31	+ 11				+ 11
	frag.	- 1	- 30				- 4
10,8 mm	sécur.		+ 63		+ 56		+ 34
	trans.		+ 27		+ 24		+ 14
	frag.		- 9		- 8		- 6

Graphique n° 12



EXPRESSION GRAPHIQUE DES RÉSULTATS

A chaque tableau correspond un graphique qui porte le même numéro que lui. Il n'y a donc pas de graphique n° 1 et n° 2.

Le graphique n° 3 montre qu'à + 15°C on obtiendrait une valeur unique d'impactance : 555 kg/cm² en prenant une distance d'appuis de : 49 mm environ.

Le graphique n° 4 montre qu'à + 25°C on obtiendrait une valeur unique d'impactance : 518 kg/cm² en prenant une distance entre appuis de 43 mm environ.

Le graphique n° 5 nous semble une justification éclatante du bien fondé de l'impactance qui, à + 40°C, n'est fonction que de la distance des appuis.

Les graphiques n° 6 et 7 justifient parfaitement l'introduction de la nouvelle quantité appelée fragilité définie comme le quotient de la résilience par la distance des appuis. Nous avons vu que cette quantité était logarithmiquement normale.

CONCLUSIONS PROVISOIRES

Nous rapportons donc maintenant le travail absorbé par le choc, au volume "actif" de l'éprouvette, c'est-à-dire à la portion du volume de l'éprouvette compris au droit des appuis. Il nous paraît aujourd'hui singulier que personne n'y ait pensé avant nous : il est bien évident en effet que toute l'éprouvette travaille sous le choc, tous les éléments ne travaillent pas de la même façon, mais enfin ils contribuent tous à absorber le choc.

Dans le cas de la non-rupture, le volume actif se limite au volume qui sera susceptible de se déformer plastiquement. Il est alors évident que ce volume réel est une fonction du volume (théorique, pour ainsi dire) : $b \times h \times l$.

Pour la fragilité nous arrivons à dresser le tableau suivant :

Fragilité du LUCOFLEX en kg/cm²

- 16°C	0°C	+ 15°C	+ 25°C	+ 40°C
8,6	9,0	14,5	13,1	7,3

Ce tableau est évidemment déroutant : la température n'agit pas en général de cette façon sur les propriétés mécaniques. Force nous est de constater qu'en effet le LUCOFLEX, **s'il veut bien casser**, absorbera moins d'énergie à + 40°C qu'à toutes les autres températures d'essai. En effet, le LUCOFLEX est tout de même moins "fragile" à + 40°C, parce qu'il **cassera moins souvent** qu'à 0°C par exemple.

Nous avons du reste vérifié que des recuits, en faisant disparaître des tensions internes, améliorent la tenue du LUCOFLEX au choc, mais les valeurs moyennes obtenues pour la fragilité décroissent quand décroît le pourcentage de ruptures fragiles. On ne gagne donc pas tout ce qu'on espérait par les recuits.

Ces résultats nous ont permis de définir et de justifier **impactance et fragilité**. Nous souhaiterions que les praticiens de l'essai de choc nous suivent dans cette voie, abandonnant la résilience, qui aura tout de même marqué une étape dans notre connaissance des phénomènes de choc.

EXAMEN DE LA BIMODALITÉ DU PHÉNOMÈNE DE CHOC

Maintenant, à partir des mêmes résultats, nous allons tirer d'autres conclusions; mais cette fois, nous devons honnêtement prévenir le lecteur que nous avons fait le dépouillement pour voir l'allure du phénomène, car nos essais ne nous permettent pas de le caractériser avec toute la précision désirable.

Il s'agit donc d'étudier la loi de variation de la proportion des ruptures fragiles en fonction de la température, de la distance des appuis et de l'épaisseur du barreau.

En ce qui concerne la température ce problème a déjà été traité, pour les aciers, par Mademoiselle ULMO et M. BASTENAIRE dans un article publié dans la Revue de Statistique appliquée 1953, Vol. I, N° 3-4, pp. 45-62.

Tout d'abord rappelons quelques définitions :

La **température de transition** est celle où l'on observe autant de ruptures fragiles que de pseudo-ruptures impactantes.

La **température de fragilité** est celle où l'on aura 95 chances sur 100 d'observer une rupture fragile.

La **température d'impactance** est celle où l'on aura 95 chances sur 100 d'observer une non-rupture impactante. C'est en quelque sorte une **température de sécurité** d'emploi du matériau : au-dessus de cette température la désagréable rupture fragile n'arrivera pas plus de 5 fois sur 100.

La **zone de transition** s'étend de la température de fragilité à la température d'impactance.

Le tableau n° 11 nous remet sous les yeux les résultats déjà connus. Nous y trouvons, en pourcentage, le nombre relatif de ruptures fragiles en fonction des trois variables :

- épaisseur du barreau (ordonnée)
- distance des appuis (abscisse)
- température d'essai (paramètre)

Si les variations de la proportion de ruptures fragiles suivent une loi de Galton, en fonction de la température, on doit avoir des points figuratifs sensiblement alignés en portant en abscisse la température et en ordonnée (galtonienne) les pourcentages expérimentaux de ruptures fragiles fournis au tableau 11.

Ces points, au nombre de 5, devraient permettre le tracé de droites de Henry, qui nous donneraient les températures cherchées (fragilité, transition, impactance). En fait, même en accompagnant les points expérimentaux d'un segment représentant l'intervalle de confiance à 95 %, il ne nous a pas été en général possible de faire passer une droite de Henry, interceptant tous ces segments. Cette méthode d'estimation graphique est médiocre mais ici nous nous heurtons à une impossibilité scientifique.

Nous n'avons aucune raison de suspecter l'hypothèse galtonienne - peut-être au lieu de température en °C aurions-nous dû prendre une échelle en inverse des températures absolues, mais ici cela ne change rien.

Par contre, dans notre mode opératoire nous avons trouvé deux causes à cette impossibilité :

- 1) les essais à 0° et à 40°C ont été faits sur des éprouvettes **mouillées**, or, c'est justement à ces températures qu'on a un pourcentage trop fort de ruptures fragiles. Il est possible que le film d'eau ait une action physique défavorable sur la résistance du barreau au choc.
- 2) les éprouvettes des cinq essais aux différentes températures **n'ont par été sciées avec la même scie** et ne peuvent du reste pas être sciées avec une scie identique, ne serait-ce qu'à cause de l'usure. Des essais antérieurs nous ont montré que le sciage est un facteur important de dispersion des résultats. De plus, une scie neuve ou une scie à grand pas donne plus de ruptures fragiles.

Malgré tout, dans le but de dégrossir le problème, nous avons tracé "au sentiment" un certain nombre de droites de Henry (14 exactement) - 3 cas nous ayant paru absolument rebelles. Nous obtenons ainsi le tableau 12, où nous pouvons lire les températures de transition, de fragilité et d'impactance, en fonction de la distance des appuis (abscisses) et de l'épaisseur du barreau (ordonnées).

On remarquera que la température de transition s'abaisse si l'on augmente la distance des appuis. Etant donné l'imprécision extrême de leurs déterminations nous ne nous occuperons pas des températures de fragilité et d'impactance. Toutefois ces valeurs permettent d'estimer la zone de transition à 60°C environ.

Le tableau 12 permet l'établissement d'un graphique (n° 12) où nous portons en abscisse la distance des appuis et en ordonnée la température de transition.

Dans toute la mesure du possible nous avons cherché à représenter par des droites les variations de la température de transition en fonction de la distance des appuis - l'épaisseur du barreau restant constante. Ce tracé paraît justifié pour les épaisseurs de 4,2 et 10,8 mm.

Si nous admettons maintenant que l'essai de choc doit nous donner une température de transition de + 15°C pour le LUCOFLEX, nous trouvons une relation empirique entre l'épaisseur du barreau et la distance des appuis. Cette relation est contenue dans le petit tableau ci-dessous :

Epaisseur du barreau	Distance des appuis pour avoir une température de transition de +15°C
3,2 mm	31 mm
4,2	40
5,8	51
7,6	55
10,8	71

En gros, nous arrivons à la formule empirique :

$$d_{15} = 20 + 4,8 h \text{ (en mm)}$$

Dans ce cas, ces LUCOFLEX 4,2 et 10,8 mm sont normaux; ce LUCOFLEX 5,8 mm est de qualité inférieure; ces LUCOFLEX 3,3 et 7,6 mm sont, au contraire, de qualité supérieure - c'est bien ce que l'atelier avait pu constater par des essais pratiques d'usinage.

Tout ceci peut sembler un peu tiré par les cheveux. Néanmoins, il est curieux de constater que la formule empirique n'est pas tellement loin d'une **loi de proportionnalité** entre distance des appuis et épaisseur du barreau. Il est raisonnable de penser que le choix d'éprouvettes homothétiques, placées sur des appuis homothétiques conduira à la détermination d'une température de transition qui sera bien caractéristique de la qualité du LUCOFLEX, au choc.

Cette méthode des éprouvettes proportionnelles a donné d'excellents résultats en flexion lente; si elle s'étend bien au phénomène de choc, qui est une flexion rapide, la caractérisation de cette température de transition suppose encore :

- 1) un grand nombre d'éprouvettes identiques, en particulier au point de vue usinage
- 2) des essais à au moins deux températures encadrant la température de transition supposée
- 3) un mouton-pendule où la distance des appuis soit réglable, si l'on veut travailler sur des barreaux d'épaisseurs différentes.

CONCLUSION

Cette étude nous conduit d'une part à des conclusions définitives, d'autre part à des hypothèses qu'il faudra vérifier.

L'impactance est la grandeur physique à mesurer dans le cas de non-rupture. Elle est distribuée normalement.

La fragilité est la grandeur physique à mesurer dans le cas de rupture franche. Son logarithme est distribué normalement.

Ces deux quantités ont l'avantage de s'exprimer au kgcm par cm³, c'est-à-dire en kg par cm³ comme la plupart des autres mesures mécaniques.

L'emploi d'éprouvettes proportionnelles doit conduire à une détermination rigoureuse des températures de transition, fragilité, impactance. Pour obtenir des résultats homogènes deux points semblent à surveiller : usinage des éprouvettes, emploi d'éprouvettes sèches et non mouillées.