

Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 6 (1924)

Artikel: Influence du recuit sur le frottement intérieur des fils de quartz aux températures élevées [suite]
Autor: Pazziani, A. / Guye, C.-E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-741883>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

INFLUENCE DU RECUIT
SUR LE
Frottement intérieur des fils de quartz
AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

PAR

A. PAZZIANI et C.-E. GUYE

(Avec 15 figures et 2 planches.)

(Suite)

Pour l'étude du quartz, nous avons utilisé la méthode d'enregistrement photographique modifiée comme suit : à la place du tambour enregistreur que l'on utilise généralement, nous avons placé un écran de bois percé d'une fente horizontale F (fig. 7). La planchette PP plaquée contre l'écran par la latte TT reçoit le papier sensible. Le volet V permet d'impressionner l'oscillation d'ordre voulu. En général nous avons enregistré des oscillations distantes de 30 à 40 périodes l'une de l'autre. Trois à quatre mesures pouvaient ainsi être faites avec quelques centimètres de papier sensible, ce qui représente un sérieux avantage sur le dispositif à tambour. La figure 8 montre le genre d'épreuve que nous avons obtenu.

Le spot lumineux était produit au début par une fente de largeur réglable éclairée par une lampe Nernst. Nous avons par la suite simplifié ce dispositif en employant une simple lampe à incandescence comme source lumineuse, la fente réglable de l'écran nous permettant d'en isoler un filament ce qui nous

fournissait un spot très fin¹. Il faut avoir soin de projeter un filament très régulier, sans sinuosité, qui seul permet des mesures précises. La mise au point doit être très rigoureuse.

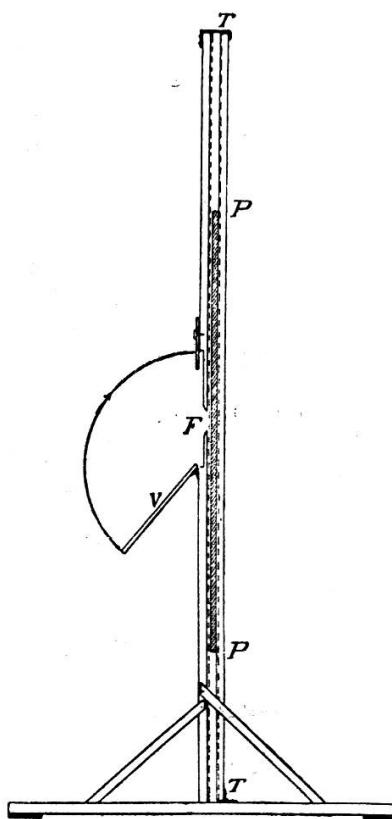


Fig. 7.

4. Les Fils étudiés.

Nous avons eu soin de choisir les fils les plus réguliers. Pour cela nous les avons observés au microscope. Nous avons constaté sur quelques-uns de fines stries transversales dont nous ignorons la cause. Dans aucun cas, nous n'avons pu observer, après le recuit, des centres de cristallisation analogues à ceux qui se forment dans les verres que l'on chauffe, ou dans la silice fondue lorsqu'elle commence à donner de la tridymite

¹ Nous recommandons ce procédé très pratique et très précis pour des mesures de ce genre.

par chauffage. Les diamètres des fils indiqués dans nos courbes sont des diamètres moyens résultant en général de cinq mesures au moins. Nous avons remarqué qu'il est impossible de préparer des fils rigoureusement cylindriques; l'étirage du verre donne à ce point de vue des résultats meilleurs que le quartz dont les



Fig. 8.

ils ont des diamètres extrêmes variant souvent de 10 %, sur une longueur de 22 centimètres.

La fixation des fils aux pinces américaines doit être faite avec le plus grand soin, car le moindre jeu peut provoquer par glissement de très grandes erreurs sur le décrément. Au début nous avons cimenté de petites douilles d'argent ou de nickel sur les

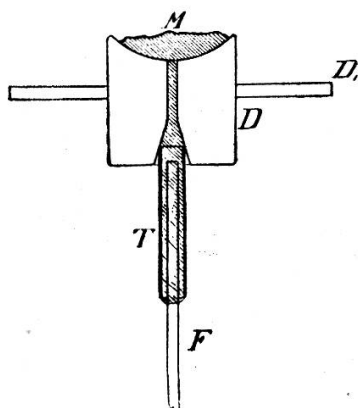


Fig. 9.

extrémités de nos fils avec un ciment formé par de la silice amorphe mélangée à une solution aqueuse épaisse de silicate de soude. Ce ciment demande deux à trois jours pour sécher et résiste mal à la température; si on le chauffe trop longtemps, il devient friable et cède facilement. Nous l'avons remplacé dans la suite par un ciment à prise rapide utilisé par les dentistes¹.

¹ Ciment Harward.

Ce ciment durcit complètement en une demi-heure et résiste parfaitement à une température de 350 à 400 degrés sans subir aucune altération. L'opération de cimentage est difficile vu l'exiguïté des tubes et la viscosité du ciment. Nous l'avons rendue très aisée au moyen du dispositif indiqué par la figure 9. La pièce de laiton D est percée d'un trou conique. Le tube à cimenter y est introduit, et le ciment placé en M est comprimé par la simple pression du pouce. Le fil F est ensuite introduit et on le retire avec la douille de la pièce de laiton avant la prise du ciment. Dans le cas où une soudure n'est pas très bien faite, on dissout simplement la douille et le ciment dans l'acide nitrique. Nous avons essayé aussi avec succès ce mode de fixation pour des fils métalliques très fins. Un fil d'acier de 0,07 mm de diamètre dont les extrémités sont cimentées dans de petites douilles se brise à la traction sans que le ciment n'ait aucunement cédé.

CHAPITRE IV

A. Résultats des expériences faites sur les fils de verre.

Notre étude a porté sur cinq fils que nous avons choisis de faible diamètre afin d'avoir des oscillations lentes qui rendent plus aisées les mesures faites par la méthode de Poggendorf. Avant d'effectuer les mesures, nous avons soumis les fils à des oscillations d'accommodation, car nous avons constaté de notables différences dans la valeur du décrement suivant que le fil a été accommodé ou pas. Par exemple un fil d'essai nous a donné avant l'accommodation un décrement de 0,00934 et après de 0,00826.

La méthode de Poggendorf peut être considérée comme suffisamment précise si l'expérimentateur est habile et si les périodes d'oscillations ne sont pas trop brèves. Ainsi pour une période de 7,3 secondes l'écart maximum sur la moyenne de cinq mesures était de 2 à 3 %, exactitude suffisante pour le but que nous poursuivons. Nos fils ayant des diamètres différents, nous avons examiné si des variations de la tension influaient sur le

décroissement. Un essai sur un fil nous a montré qu'une variation de tension de 15 grammes n'a aucune influence sensible.

Fil N° 1 (Planche I). — Nous l'avons étudié sans le recuire. La courbe a été établie aux températures croissantes. Vers 140° , λ passe par un minimum et vers 40° par un maximum. Ce maximum n'est pas mentionné dans la courbe du verre d'Iéna du mémoire de M^{lle} Wassilieff ¹, courbe relative il est vrai aux températures décroissantes. Ce fil s'étant brisé au cours des expériences nous n'avons pas pu l'étudier aux températures décroissantes.

TABLEAU I

Fil N° 1.

Température	Décroissement
17°	0,00941
65°	977
90°	546
135°	438
210°	504
260°	617

Fil N° 2. — Il a été recuit pendant 5 heures à 600° et ramené à la température ordinaire par un abaissement progressif de la température qui a duré 4 heures. Ce fil montre une variation thermique de λ très analogue à la précédente avec son minimum vers 140° . Nous n'avons pas poussé la température plus haut que vers 200° , vu que nous avons déjà dépassé la région d'anomalie. Les diamètres très voisins des fils 1 et 2 ont fourni des valeurs absolues du décroissement très voisines. Ce fil n'a pas été étudié aux températures décroissantes.

Fil N° 2'. — C'est le même que le précédent mais de 15 cm de longueur seulement. L'allure thermique de λ n'a pas de différence suivant que l'on parcourt l'échelle des températures en montant ou en descendant. Le dernier point de la courbe descendante a été déterminé en refroidissant le fil à -20° avec un mélange réfrigérant de glace pilée et de sel marin. Cette dimi-

¹ Ch.-E. GUYE et WASSILIEFF. *Archives*, mars-avril 1914.

nution brusque de λ correspond aux courbes établies par Ch.-E. Guye et Einhorn aux basses températures. La diminution de longueur du fil n'influe que peu sur le décrément; les courbes 2 et 2' sont en effet sensiblement superposables¹. Pour ce fil recuit la variation de λ est donc *grosso modo* reversible.

TABLEAU II.

Fil N° 2'

Température	Décrément
14°	0.00850
76°	516
200°	509
230°	939
204°	562
140°	370
100°	330
65°	726
15°	793
20°	533

Fil N° 2''. — Nous avons essayé sur le même fil un recuit de 20 heures suivi d'une période de refroidissement de 5 heures. L'allure thermique de λ est la même que la précédente à peu de chose près. A partir du minimum, l'augmentation du décrément semble être cependant moins brusque.

Fil N° 2'''. — Nous avons recuit ce même fil pendant 16 heures et l'avons ramené à la température ordinaire par un lent refroidissement de 11 heures. Ici encore la variation thermique croissante du décrément a la même allure. Le minimum se produit à température plus haute que dans les autres fils. Il ne semble donc pas que ces traitements thermiques aient modifié la nature du fil d'une façon sensible.

Fil N° 3. — Nous avons d'abord examiné sur ce fil si la courbe correspondant aux températures croissantes se super-

¹ Nos courbes sont établies en ne tenant compte que des 4 chiffres qui suivent la virgule. Une erreur par défaut est par conséquent plus petite que $\frac{1}{10^4}$.

posait exactement à celle des températures décroissantes. Cette superposition se produit exactement. Ce fil a subi un recuit de 16 heures et un refroidissement de 4 heures. Le point correspondant à la température de -20° a été établi avec les températures décroissantes. Nous voyons qu'à partir de 200° jusqu'à 360° l'augmentation du décrement est faible. Le minimum a lieu encore entre 130° et 140° . La deuxième courbe de cette figure indique la variation de la période des oscillations en fonction de la température, l'échelle des ordonnées se lisant à droite. On constate une légère augmentation de la période ce qui indique une diminution du deuxième module d'élasticité. Cette courbe ne semble pas être influencée par celle de la variation de λ ; c'est très sensiblement une droite.

TABLEAU III.

*Fil N° 3.*Amplitude Maximum: 5° .

Torsion exprimée en millièmes: 0,000063.

Température	Décrement	Période
18°	0,008799	7",295
70°	5490	310
90°	3424	283
164°	3645	283
240°	4331	294
280°	4199	300
360°	4932	300
204°	4218	—
160°	3304	289
110°	2884	301
86°	3825	301
60°	7591	307
17°	8245	301
-20°	5525	282

Fil N° 3'. — C'est le même fil que le précédent, mais ayant subi un recuit beaucoup plus long de 40 heures et un refroidissement de 16 heures. La variation du décrement est en tous points analogue à celle du fil 3.

Fil N° 4. — C'est l'étude de l'influence sur le décrément d'un court recuit de deux heures à 300° . Ce recuit ne fait que changer la valeur absolue du décrément. La courbe inférieure a exactement la même allure que la courbe supérieure. La période n'est pas influencée d'une façon sensible par ce changement du décrément.

Fil N° 5. — C'est un second essai de fil non recuit. Cette courbe présente une partie presque horizontale à partir de 210° degrés comme dans la courbe du fil 3. Le minimum pour les températures croissantes et décroissantes se produit encore entre 130° et 140° . La période pour le premier point déterminé à 20° a une valeur passablement plus grande que pour le second point à 20° . Nous pensons que cela provient du fait que ce fil n'a pas été accommodé. Pour les températures décroissantes, la période décroît linéairement, comme pour le fil 3.

TABLEAU IV.

Fil N° 5.

Amplitude Maximum: 5° .
Torsion exprimée en millièmes: 0,000046

Température	Pression	Décrément	Période
23°	30 mm	0,0136	$10'',368$
90°	20	642	208
110°	20	611	204
160°	25	633	212
210°	20	918	232
320°	22	1006	226
210°	22	742	198
160°	22	519	180
90°	27	503	185
25°	15	1250	167
-18°	10	965	160

Fil N° 5'. — C'est le même fil que précédemment; il a été recuit pendant 15 heures et refroidi très lentement pendant 20 heures. Ce traitement semble avoir rendu la matière plus homogène, car un séjour de deux heures à 320° dans l'appareil

d'oscillation ne modifie plus le décrement. En effet, la courbe des températures décroissantes coïncide avec les températures croissantes. Le rapport des ordonnées des maximums aux ordonnées des minimums est pour le fil 5 (courbe des températures croissantes) $\frac{12}{4.4} = 2,73$. Pour le fil 5', ce même rapport vaut $\frac{9.3}{2.5} = 3.7$. On voit par conséquent que la variation du décrement entre le maximum et le minimum est relativement plus grande pour le fil recuit que pour le fil non recuit.

TABLEAU V.

Fil N° 5'.

Température	Décrement	Période
20°	0,00932	9",216
90°	462	—
110°	307	215
160°	289	235
210°	436	239
320°	490	246
210°	314	240
160°	290	239
110°	271	226
90°	418	228
20°	914	211
—18°	526	219

La période accuse ici une moins grande variation que dans le cas précédent.

Fil N° 6. — On constate pour ce fil non recuit un parallélisme entre les deux systèmes de courbes. Les périodes correspondant aux températures croissantes sont plus longues que celles des températures décroissantes. Or, λ subit une variation analogue. Par contre le minimum de λ ne correspond à rien de semblable pour la période. Celle-ci a été très soigneusement étudiée pour ce fil. Chaque point est une moyenne de 5, parfois de 6 mesures.

Le rapport $\frac{\Gamma_{320}}{\Gamma_{20}}$ est égal à 1.0059.

La variation du second module d'élasticité est par conséquent très faible pour cet intervalle de température.

TABLEAU VI.

Fil N° 6.

Température	Décément	Période
20°	0,01451	5",712
90°	636	743
110°	538	737
160°	587	746
210°	863	746
310°	1060	749
210°	634	718
160°	431	720
110°	427	723
90°	531	725
20°	1244	705

Dans toutes ces mesures l'angle maximum de torsion n'a jamais dépassé 5° ce qui représente, évaluées en millièmes, des torsions inférieures à 0,005. Entre chaque point nous avons attendu au minimum 1 heure $\frac{1}{2}$ et au maximum 3 heures que la température fût stationnaire, temps que nous avons constaté être amplement suffisant. Remarquons que les courbes ne sont pas entièrement comparables car la longueur des fils diffère. Ces variations de longueur proviennent du fait que quelques-uns de nos fils ont été brisés lors de la dissolution des douilles dans l'acide nitrique. Du reste cela n'a pas d'importance pour l'interprétation de nos résultats vu que seule l'allure de ces courbes nous intéresse.

Le meilleur moyen pour faire de bonnes lectures est d'attendre que dans une oscillation le réticule coïncide avec une division de la règle. On évite ainsi l'évaluation des fractions de millimètre toujours délicates lorsqu'on doit les faire rapidement. En outre, afin d'éliminer dans la mesure du possible les erreurs dues aux déplacements du zéro mentionnées plus haut, nous avons toujours fait alternativement une mesure à droite puis une à gauche.

Nous n'avons pas observé de variations systématiques du décément avec la période. Le vide que nous avons pu faire dans notre appareil variait de 30 millimètres au maximum à 10 millimètres au minimum. Ces variations de pression sont trop

faibles pour avoir une influence quelconque sur les amortissements relativement grands qui se produisent à température élevée.

Le calcul montre qu'il n'y a pas lieu de tenir compte de la variation du diamètre et de l'allongement des fils sous l'influence de la température. En effet, si l'on ne tient pas compte de la dilatation, on a par exemple pour le fil 5': $\frac{G_{320}}{G_{20}} = 0,735$ et en tenant compte de la dilatation: $\frac{G_{320}}{G_{20}} = 0,753$.

Pour avoir une très grande approximation dans la détermination du rapport $\frac{G_{t_0+t}}{G_{t_0}}$ il nous faudrait un dispositif particulièrement sensible, car la valeur de ce rapport dépend de la période T. Nous indiquons en note à la fin de ce mémoire comment on peut le réaliser.

Le verre que nous avons étudié contenait 74,22 % de SiO_2 , 4,72 % de Al_2O_3 et 11,64 % de K_2O .

L'examen des courbes précédentes montrant la variation thermique du décrément nous prouve que nos divers essais de recuit sont sans effet appréciable sur le minimum observé dans la variation de λ . Nos courbes semblent se raccorder avec celles de M. Einhorn établies pour les basses températures. Nous n'avons pas remarqué que la période passe par un minimum en même temps que le décrément. Elle semble au contraire augmenter linéairement avec la température¹.

B. Résultats des expériences faites sur les fils de verre de quartz.

Nous avons choisi 5 fils avec les mêmes précautions que les fils de verre et nous les avons soumis à divers traitements thermiques. Les oscillations torsionnelles ont été enregistrées par la méthode photographique que nous avons modifiée de la façon indiquée page 106. Pour chaque température, nous n'avons fait que trois enregistrements, car les épreuves photographiques, à condition d'être nettes, se prêtent à des mesures très précises (aisément au 1/10 de mm). L'ensemble des résultats est donné par la planche II.

¹ Les courbes de variation du décrément sont données par la planche I.

Fil de quartz N° 1. — Nous l'avons choisi de faible diamètre et nous ne lui avons pas fait subir de recuit préalable. On remarque un minimum de λ à 140° et une faible augmentation du décrément jusqu'à 320° . Pour les températures décroissantes, le minimum est supprimé; λ décroît constamment. Pour ce fil l'anomalie thermique a disparu par un léger recuit de 2 heures à 320° . Quant à la période, elle diminue régulièrement entre -20° et 320° . Les sinuosités de la courbe c peuvent provenir d'erreurs accidentelles de lecture.

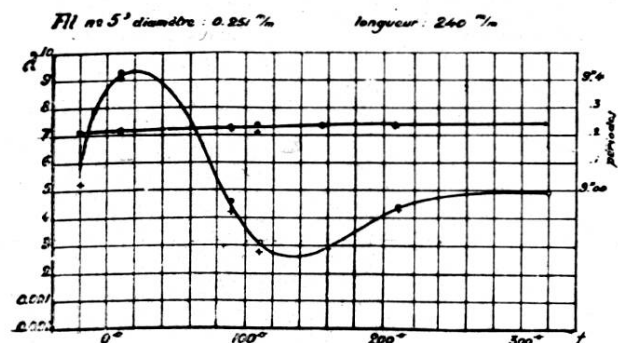
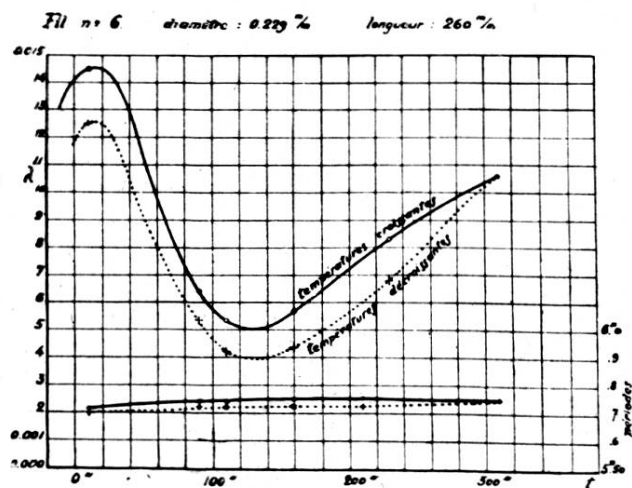
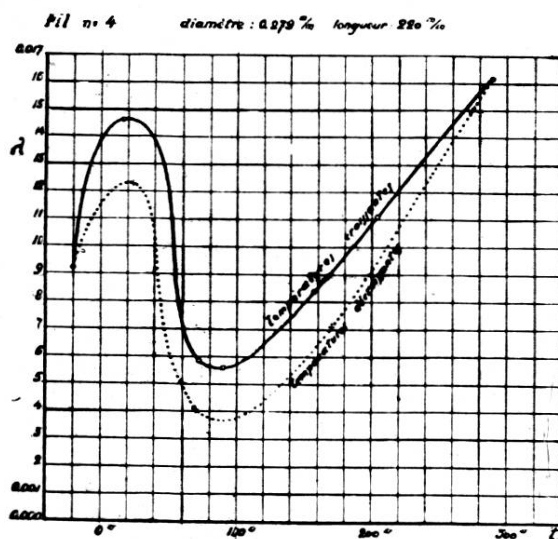
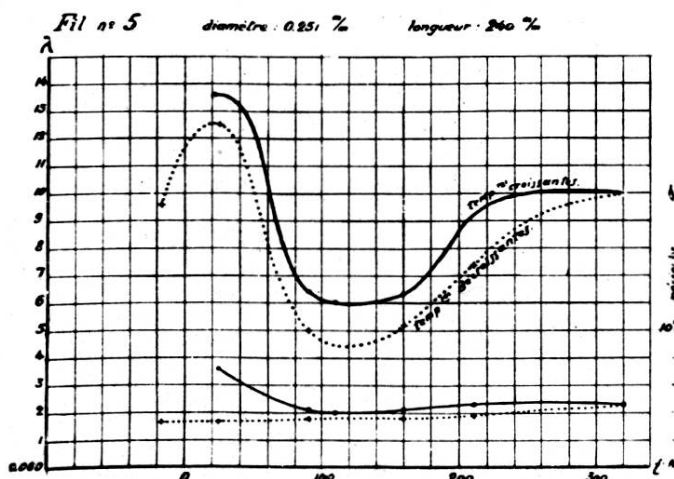
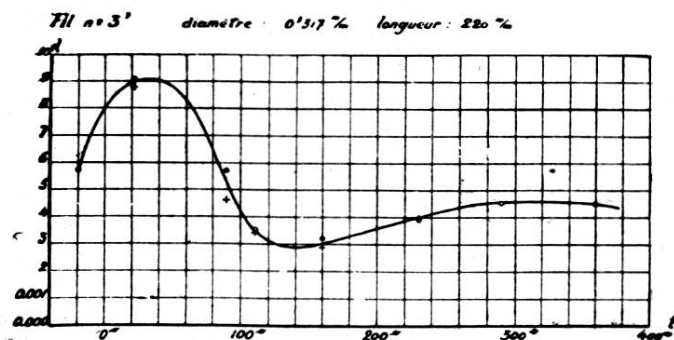
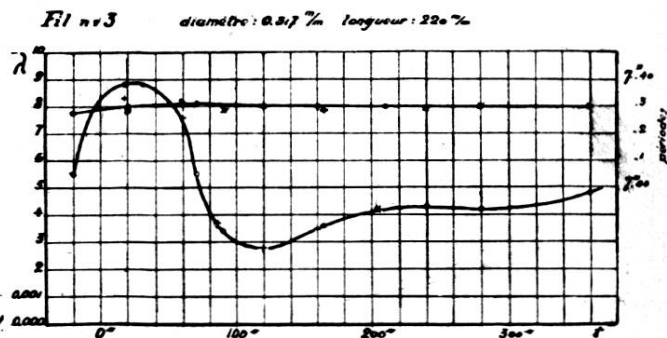
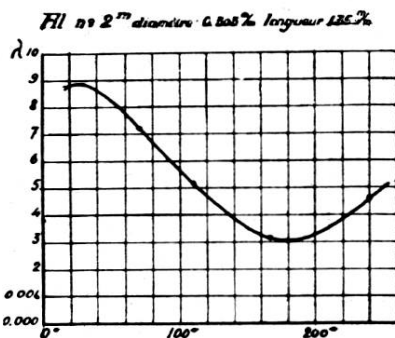
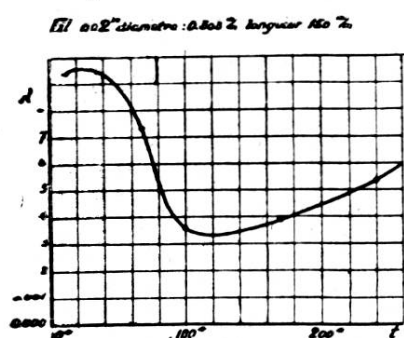
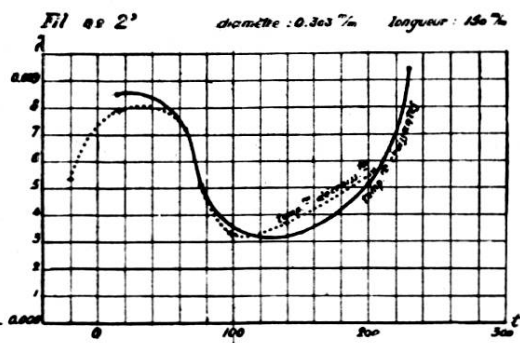
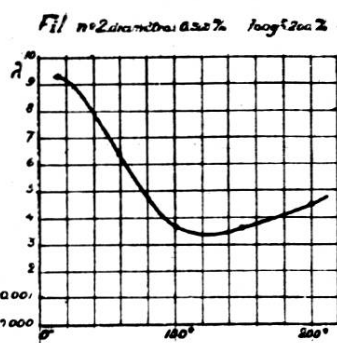
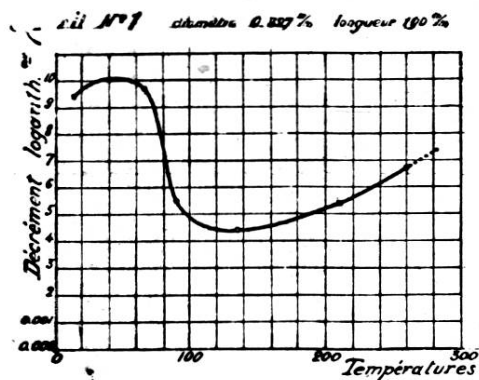
TABLEAU VII

Fil de quartz N° 1.

Température	Décrément	Période
20°	0,01433	$14'',818$
85°	1680	712
110°	1566	734
160°	1531	654
210°	1596	618
320°	1663	537
210°	1254	589
160°	1214	623
110°	1185	743
85°	1142	768
25°	1103	797
-20°	607	815

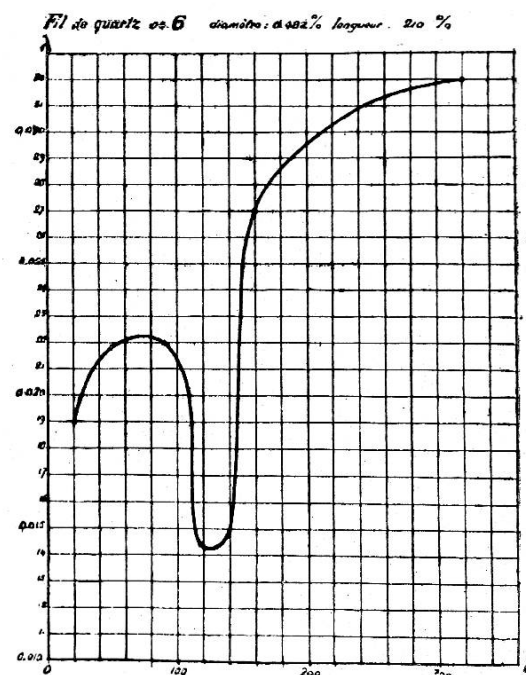
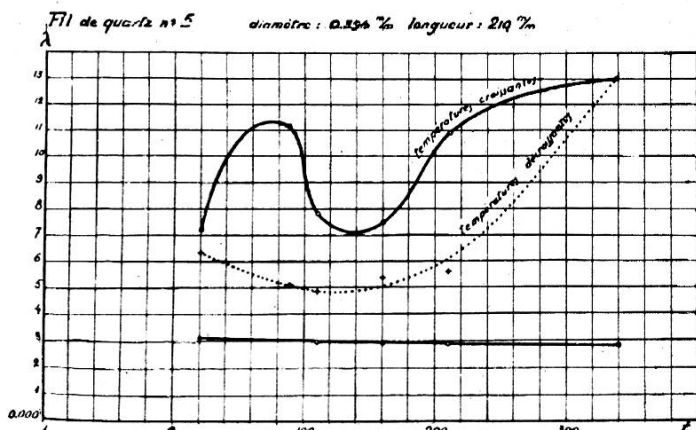
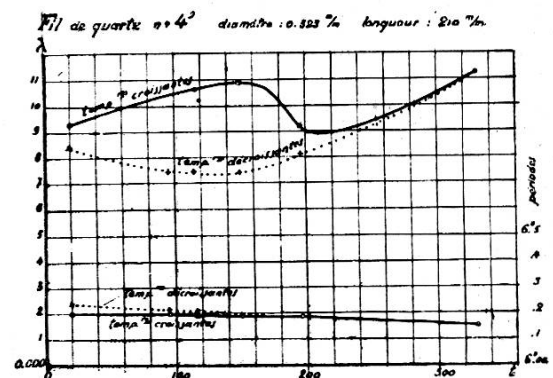
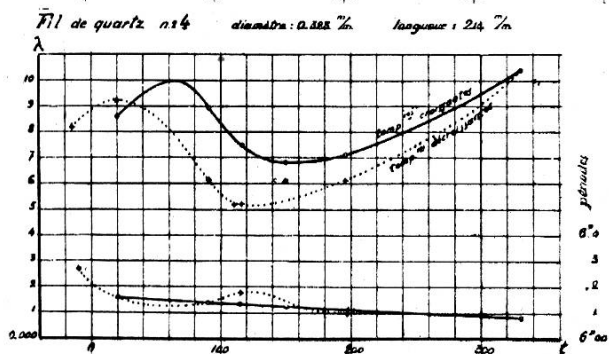
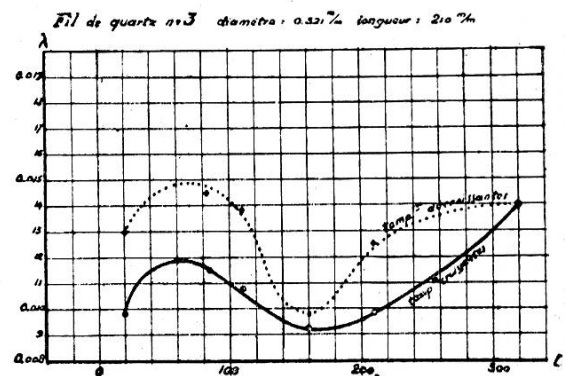
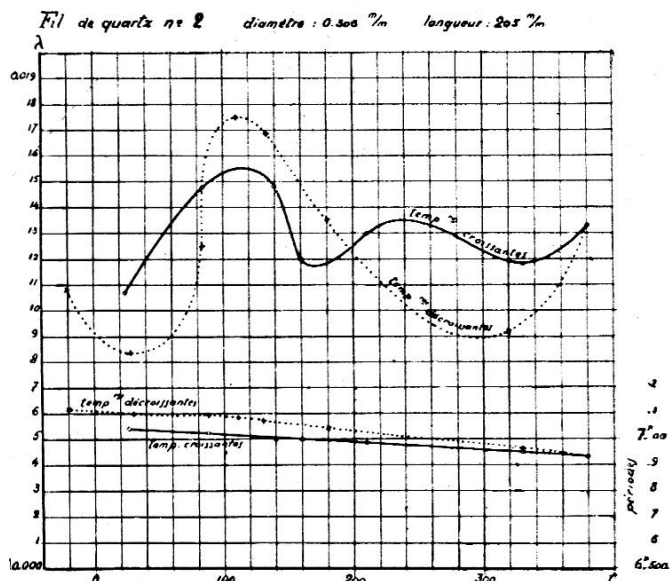
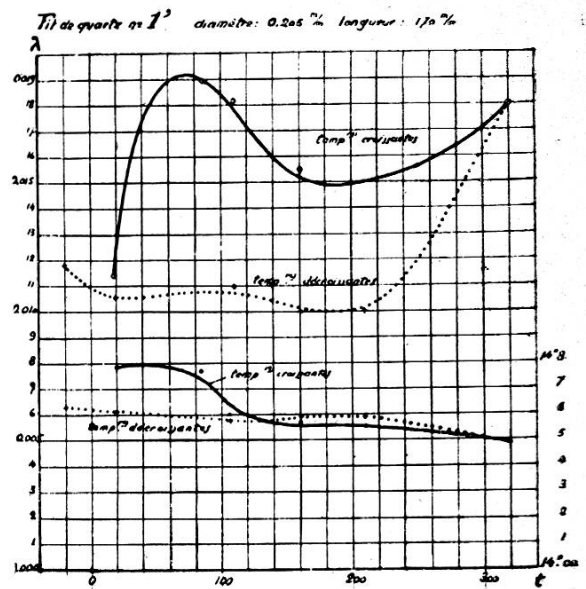
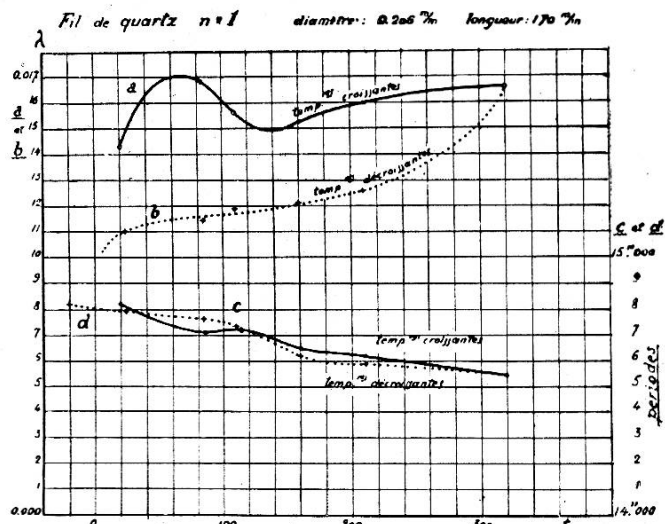
Fil de quartz N° 1'. — Nous avons recuit le fil 1 pendant 12 heures à 800° et ramené à la température ordinaire pendant 6 heures. Il nous a fourni des courbes où le minimum de λ se produit entre 160° et 170° pour les températures croissantes et les températures décroissantes. Les deux courbes 1 et 1' intéressant λ sont caractérisées par le fait qu'un court passage à 320° fait diminuer le décrément beaucoup plus que dans les verres. La période est encore décroissante, presque linéairement. Les points a et b de cette courbe ont des ordonnées un peu grandes probablement à cause d'un manque d'accommodation.

PLANCHE I.



Variation de λ en fonction de la température dans les fils de verre.

PLANCHE II.



Variation de λ en fonction de la température dans les fils de quartz.

TABLEAU VIII
Fil de quartz N° 1'.

Température	Décroissement	Période
17°	0,01132	14",788
85	1881	777
110	1720	598
160	1564	529
210	1580	520
320	1741	672
210	1025	590
160	1088	573
110	1135	573
23	1054	607
—20	1199	627

Fil de quartz N° 2. — Il a été recuit pendant 15 heures aux environs de 800° et ramené ensuite lentement à la température de la salle pendant 20 heures. Il nous a fourni une courbe très irrégulière avec un minimum à 160° pour une température croissante et un autre vers 260° pour les températures décroissantes. La variation de la période est par contre remarquablement linéaire, la courbe des températures décroissantes étant au-dessus de celle des températures croissantes. Il se peut toutefois que des frottements parasites soient la cause de ces brusques variations du décroissement bien que la régularité de la période semble démontrer le contraire. Remarquons que le point correspondant à la température de 210° étant supprimé, la courbe est analogue aux précédentes.

TABLEAU IX.
Fil de quartz N° 2.

Température	Décroissement	Période
24°	0,01066	7",035
85	1478	023
140	1477	002
160	1197	005
210	1303	6",984
320	1175	948
380	1335	926
320	922	960
180	1353	7",039
135	1696	072
110	1755	076
85	1245	089
20	831	092
—20	1088	104

Fil de quartz N° 3. — La courbe précédente nous a suggéré un nouvel essai de fil non recuit. La courbe des températures décroissantes est ici, comme pour le cas précédent, au-dessus de celle des températures croissantes. Cette variation est en contradiction avec la courbe des fils 1 et 2 où un recuit dans l'appareil même à 320° produit une diminution du décrément.

TABLEAU X.
Fil de quartz N° 3.

Température	Pression	Décrément	Période
18°	40 mm	0,00992	—
85	20	1151	—
110	20	1075	—
160	20	938	—
210	28	978	—
320	35	1409	6",088
210	40	1267	—
210	50	1263	116
160	50	972	113
110	50	1380	127
85	43	1443	122
18	50	1315	134
—20	40	1374	142

Fil de quartz N° 4. — C'est un nouvel essai de fil non recuit. Nous voyons ici se répéter ce qui se passe dans le verre où un recuit de 2 heures à 320° produit une diminution du décrément. Pour les deux courbes, le minimum se produit autour de 140 ou 150°. Les deux courbes des périodes coïncident ici très exactement.

TABLEAU XI.
Fil de quartz N° 4.

Température	Décrément	Période
20°	0,00863	6",159
90	887	140
118	873	134
118	754	135
150	668	112
195	712	102
330	1031	076
195	564	116
150	613	122
118	512	180
90	612	138
20	919	157
—15	826	270

Fil de quartz N° 4'. — C'est le fil 4 qui a été recuit pendant 15 heures à 700° environ et ramené à 200° pendant 3 heures. Le minimum pour les températures croissantes se trouve transporté à 240° et pour les températures décroissantes vers 140°. Le maximum est supprimé, ou du moins, réapparaîtrait-il vers 0° si λ diminuait brusquement aux basses températures. Les courbes des périodes ne coïncident pas, la deuxième étant au-dessus de la première.

TABLEAU XII
Fil de quartz N° 4'.

Température	Décroissement	Période
20°	0,00928	6",202
95	1003	—
118	1100	202
150	1089	188
198	917	190
325	1169	154
198	815	191
150	743	203
118	749	211
95	743	210
20	843	247
—20	978	264

Fil de quartz N° 5. — Son diamètre est plus fort que celui du fil 4; nous avons soumis ce fil à un recuit analogue au précédent. Les courbes ont un minimum à 140° environ.

TABLEAU XIII.
Fil de quartz N° 5.

Température	Décroissement	Période
20°	0,00720	4",313
95	1112	243
118	781	283
150	741	281
198	1095	286
325	1202	288
198	555	280
150	503	281
118	483	287
95	507	333
20	628	316
—20	1007	300

Fil de quartz N° 6. — Quant à celui-ci, nous l'avons pris de diamètre plus que double de celui du fil 1. Nous l'avons recuit 12 heures à 700° environ et refroidi seulement pendant 3 heures.

Nous ne l'avons étudié soigneusement que pour les températures croissantes. Les fortes variations de λ qu'il montre sont très particulières. Ce résultat nous fait supposer que si nous avions pu étudier des fils de plus gros diamètre, nous aurions eu des variations plus grandes encore. Du reste, nous voyons qu'entre les fils 4 et 5 de diamètre respectif de 0,32 mm et de 0,39 mm c'est le deuxième qui accuse la plus forte anomalie.

TABLEAU XIV.
Fil de quartz N° 6.

Température	Décroissement	Période
20°	0,01192	3'',069
95	2212	030
118	1444	2'',982
150	2765	924
198	2290	974
320	3235	965

Remarques diverses.

1° Dans ces expériences, le mode opératoire était le même que pour les fils de verre. Le système oscillant était le même. Son moment d'inertie valait 1847 c.g.s.; il a été calculé d'après la formule :

$$I_0 = \frac{T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} I_a$$

où I_0 est le moment d'inertie de l'oscillateur avec l'anneau et I_a le moment d'inertie de la surcharge annulaire.

La courbe des périodes qui accuse le maximum de différence entre T_{20} et T_{360} est la courbe du fil N° 2. On a en effet,

$$\frac{T_{20}}{T_{360}} = \frac{7'',035}{6'',926} = 1,0158 .$$

Le rapport des deux périodes à 20° est aussi assez grand:

$$\frac{T_{20}}{T'_{20}} = \frac{7'',092}{7'',035} = 1,0081 .$$

Les torsions auxquelles nous avons soumis les fibres n'ont pas excédé celles des fils de verre, sauf pour le fil N° 6 où la

torsion a été au maximum de 0,00007. De tous nos fils c'est le seul qui nous ait donné des variations systématiques de λ avec l'amplitude.

TABLEAU XV.

Température	Amplitude	Torsion	Décrément
20°	3°10'	0,000060	0,01330
	3°00	57	0,01170
	2°45'	50	0,01075
85°	2°	38	0,02392
	1°40'	33	0,02170
	1°33'	29	0,02075

Des variations du même ordre de grandeur se sont produites dans ce fil pour toutes les températures aux grandes amplitudes. Sur le fil 5, nous avons aussi étudié à 20° l'influence de l'amplitude des oscillations sur le décrément. Le tableau suivant montre que pour des torsions variant de 0.00009 à 0.000041, c'est-à-dire beaucoup plus fortes que celles des fils étudiés, le décrément diminue de 63 %.

TABLEAU XVI.

Amplitude	Torsion	Décrément
6°	0.000090	0.01681
4°40'	77	788
3°30'	68	620
2°30'	57	623

Ceci confirme ce que nous avons dit plus haut sur la difficulté qu'il y a à déterminer une amplitude à partir de laquelle on peut considérer λ comme constant.

Il est clair que c'est non pas l'amplitude que l'on doit adopter mais la torsion (ainsi que nous l'avons définie plus haut) comme mesure de la déformation.

2° Nous n'avons pas toujours opéré à la même pression; il nous est arrivé d'avoir un vide de 30 mm seulement. Le vide le plus poussé que nous avons pu obtenir avec la trompe à eau a été de 10 mm. Ces faibles différences ne sont pas à considérer, car pour le fil 5 le décrément à 736 mm de pression vaut 0,01424 et à 10 mm 0,01279, ce qui représente une variation de 9,6 %. Si l'on admet que la variation de λ en fonction de la pression est

linéaire, on aurait une augmentation de 0,3 % si l'on augmentait la pression de 10 mm à 30 mm, augmentation dont on peut ne pas tenir compte.

Il est en plus évident que les variations des dimensions du fil sous l'influence de la température ne doivent pas non plus entrer en considération, vu le faible coefficient de dilatation du verre de silice.

3° La mesure des périodes d'oscillation est longue et fastidieuse lorsqu'on l'effectue par la méthode des coïncidences ou en employant un chronographe. En outre, cette dernière méthode ne fournit que des résultats qui dépendent beaucoup de l'habileté de l'observateur. Il serait à notre avis préférable d'utiliser à l'avenir le dispositif suivant, basé sur la méthode stroboscopique de Lippmann. Cette méthode a, outre l'avantage d'être très exacte, celui d'être beaucoup plus rapide lorsqu'on a un grand nombre de mesures à effectuer. Rappelons brièvement le principe de la méthode ordinaire de Lippmann¹.

Soient deux pendules ayant à peu près la même période d'oscillation. Soient α_1 et α_2 leurs amplitudes respectives. On peut les enregistrer photographiquement en fixant un miroir au couteau de chacun des pendules. Après n_1 oscillations du premier pendule et n_2 du deuxième on enregistre les élongations respectives α_1' et α_2' . Le rapport des périodes est donné par la relation:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{2\pi n_2 + \alpha_2 - \alpha_2'}{2\pi n_1 + \alpha_1 - \alpha_1'}.$$

Si l'on connaît T_1 on a tout de suite T_2 .

Dans les pendules où l'amortissement des oscillations est très faible, le mouvement vibratoire qu'effectue le spot peut être envisagé comme la projection sur un diamètre du mouvement d'un point sur une circonférence. On a alors: (fig. 10).

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \text{arc sin } \frac{OP}{OR} \\ &= \text{arc sin } \frac{OP}{ON}\end{aligned}$$

¹ LIPPMANN. C. R. T., CXXIV, p. 125 (1897).

Or, l'enregistrement photographique nous donne des épreuves dans le genre de celle de la figure 11

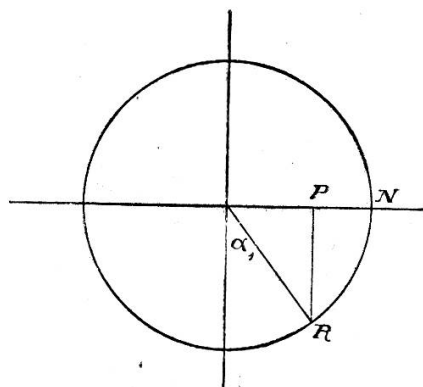


Fig. 10.

où l'on a:

$$\text{Amplitude} = \frac{x + y}{2}$$

$$\text{Elongation} = \frac{y - x}{2}$$

d'où:

$$\alpha'_1 = \arcsin \frac{y - x}{y + x}$$

$$\alpha'_2 = \arcsin \frac{y' - x'}{y' + x'}$$

Pour appliquer cette méthode à la détermination des périodes des oscillations torsionnelles nous avons imaginé le dispositif de la fig. 12.



Fig. 11.

Devant le pendule de torsion P_1 est suspendu un pendule ordinaire P_2 dont la période peut être accordée avec celle du premier pendule au moyen de la sphère mobile. Les miroirs M_1 et M_2 réfléchissent l'image d'une fente percée dans un écran S derrière lequel est la source lumineuse. Devant l'écran est un obturateur photographique O_1 si possible à grande vitesse et un objectif O_2 . On enregistre les amplitudes des deux pendules,

puis, après n_1 oscillations du premier et n_2 du deuxième, on déclanche l'obturateur. On enregistre aussi les élongations α'_1 et α'_2 . Il faut ne pas compter un nombre trop grand d'oscillations, car les amortissements seraient trop considérables.

Nous avons employé comme source lumineuse une lampe à arc et pour écran E deux films cinématographiques placés perpendiculairement, chaque spot oscillant sur son film respectif¹. L'obturateur que nous avons employé donnait des instantanés de 1/100, les périodes des oscillations des pendules étant à

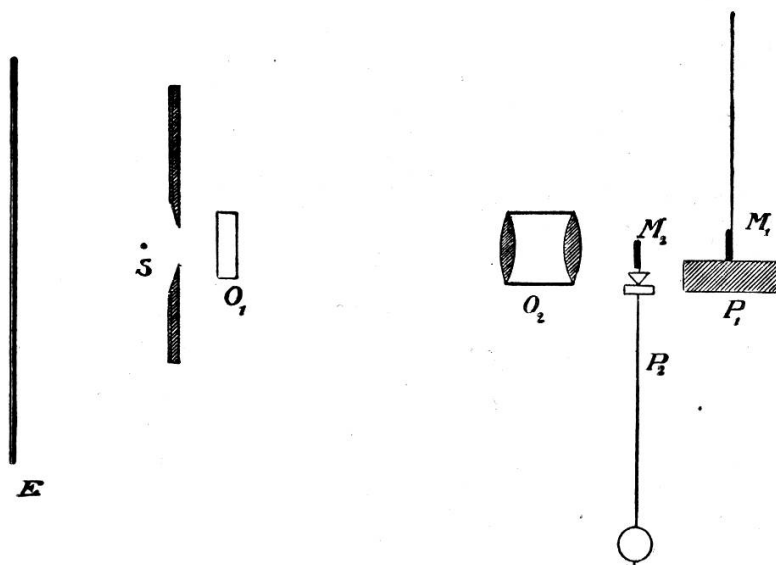


Fig. 12.

peu près de 3 secondes. Pour des oscillations plus rapides il faudra employer un obturateur plus rapide encore. On pourra aussi employer avec avantage comme source de lumière une étincelle électrique lumineuse qui donnera des instantanés très brefs.

CHAPITRE V

Etude microscopique des fils de verre.

Des expériences nombreuses ont montré que des recuits convenables suppriment en général la trempe des verres. Il

¹ Il faut utiliser des films négatifs qui sont plus sensibles que les positifs.

nous a paru intéressant de voir si l'élévation progressive de température analogue à celle que subissaient nos fils dans l'appareil d'oscillation ne produisait pas des variations des propriétés optiques des verres parallèles à la variation du décrement. Nous avons dans ce but fait préparer avec nos fils des coupes microscopiques. Pour faciliter leur préparation, nous avons coulé dans des tubes de laiton du ciment Harward à prise rapide, et, pendant que le ciment était encore plastique, nous les avons remplis avec des fils dont l'axe était parallèle à celui du cylindre. Nous avons examiné des coupes dont l'épaisseur variait de 0,05 à 1 millimètre, coupes perpendiculaires et parallèles à l'axe des fils. Des préparations de 0,05 à 0,1 mm d'épaisseur ne nous ont révélé aucune biréfringence pas plus pour les fils recuits que pour les non recuits. Nous pensons que cela provient du fait que les coupes étaient trop minces, car le retard optique est comme l'on sait proportionnel à l'épaisseur de la substance traversée par le faisceau lumineux,

$$R = e(n_1 - n_2)$$

n_1, n_2 étant les indices de réfraction n_g, n_m, n_p principaux de la substance cristalline.

Par contre les coupes de 1 millimètre d'épaisseur présentent le phénomène des extinctions roulantes qui prouve l'existence de tensions intérieures. Nous n'avons pas constaté de répartitions symétriques de ces biréfringences (zones coaxiales, par exemple) comme on peut en constater dans les prismes de verre trempé; cette inégalité de répartition montre que le refroidissement ne s'est probablement pas fait symétriquement. Afin d'examiner si la distribution de ces plages inégales au point de vue optique subit des variations lors de l'élévation de la température, nous avons chauffé nos préparations directement sous le microscope polarisant. A cet effet, nous avons construit un petit four à résistance de fer qui se plaçait directement sur la platine du microscope recouverte d'un carton d'amiante pour éviter l'échauffement (fig. 13). La préparation placée dans la glissière pouvait être mise à la hauteur voulue dans le four grâce à la pièce A; deux vitres fermaient les fenêtres d'éclairage. Les températures ont été déterminées en plaçant dans le four,

sous la préparation, le réservoir d'un thermomètre à mercure. L'objectif était entouré d'un manchon métallique M dans lequel circulait un courant d'eau refroidissant l'objectif. Nous n'avons examiné à une température croissante que les coupes épaisses. Nos observations ont été faites à 20 degrés, 67°, 95°, 150°, 200 degrés. La préparation a été maintenue environ une heure à température constante avant chaque observation. Jusqu'à 150° nous n'avons observé aucun changement dans les zones biréfringentes; cependant, après un recuit de 1 heure à 220°, la biréfringence diminue et après refroidissement, les modifications provoquées par cette cuisson ne subissent plus aucun changement. La fig. 14

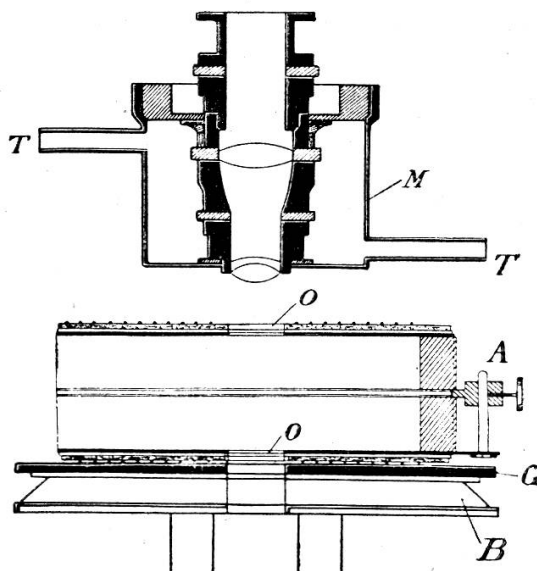


Fig. 13.

montre un fil de quartz avant le recuit de la préparation, et la fig. 15 la même préparation à la température ordinaire après son passage à 220°. On voit que les tensions intérieures semblent avoir diminué mais qu'elles ne sont cependant pas supprimées. Les modifications provoquées par le chauffage ne sont donc pas réversibles quant à la biréfringence. Or, ceci paraît en contradiction avec la variation thermique du décrément. En effet, le recuit qu'ont subi nos fils soit avant les mesures du décrément soit pendant, dans l'appareil d'oscillation, ne modifie pas le décrément pour les fils de verre; pour le quartz, l'anomalie est atténuée et non supprimée. En outre il est à remarquer que

la plupart de nos brusques variations de λ se produisent avant 220° tandis que nous n'avons pas observé de variation dans la biréfringence avant cette température. Le minimum de λ soit dans les verres, soit dans le quartz ne nous semble donc pas être attribuable aux seuls phénomènes de trempe.

Si l'on tient compte des expériences d'Adams et Williamson¹ sur le recuit des verres, nos temps de cuisson peuvent être considérés comme suffisants pour permettre à la matière de prendre son état d'homogénéité maximum. Dans leurs expériences, les verres ont été chauffés entre 300° et 650° .

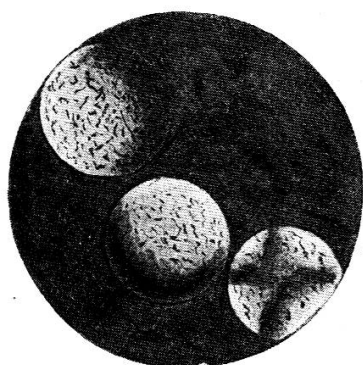


Fig. 14.

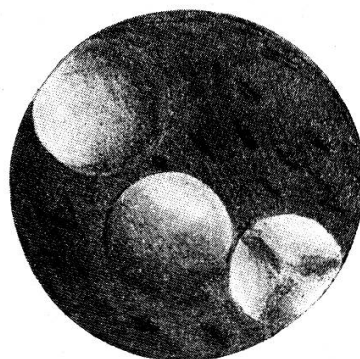


Fig. 15.

Nous proposons comme explication de l'anomalie thermique du décrément des considérations basées sur les variations de formes allotropiques de la silice. Nous avons vu au chapitre premier, que Le Châtelier admet que de toutes les formes allotropiques de la silice c'est la tridymite qui est la plus stable. Si l'on admet ce point de vue, on peut supposer que dans la fusion du quartz à 1700° il se produit de faibles quantités de tridymite; car il paraît difficile d'affirmer ainsi qu'on le fait généralement que la fusion du quartz, suivie de son refroidissement, est toujours assez rapide pour empêcher les cristallisations de se produire. Nous pensons donc que l'on peut considérer les verres et le quartz fondu comme des milieux pseudo isotropes renfermant des particules cristallisées sous forme de tridymite². Cela étant, si l'on compare nos courbes à celles de la fig. 1,

¹ ADAMS et WILLIAMSON. Le recuit des verres. *Journ. Frankl. Inst.* 190 (1920), 597.

² Etat ayant quelque analogie avec l'état colloïdal.

page 52, établies par Le Châtelier et donnant les variations des coefficients de dilatation des formes allotropiques de la silice, on constate qu'au minimum de λ correspond une brusque augmentation du coefficient de dilatation de la tridymite. En outre, remarquons que M^{lle} Wassilieff a trouvé un minimum analogue pour le verre d'Iéna situé aux environs de 240° , ce qui correspond au changement du coefficient de dilatation de la cristobalite. On peut calculer les variations de volume que ces changements de dilatation produisent dans la tridymite et la cristobalite, connaissant les variations de densité. Elles sont, évaluées en pour cent, respectivement de 0,4 et 3 %. Ce ne sont donc pas des modifications sans importance. Ceci nous semble d'accord avec les observations de M. Ch.-E. Guye qui a remarqué qu'une anomalie analogue se produisait chez les fils d'acier. Bien que cette anomalie soit atténuée par des recuits convenables, il est intéressant de remarquer qu'elle se produit à une température voisine de celle qui correspond à la formation de la cémentine. Comme nous l'avons vu, on est parvenu à atténuer l'amplitude de l'anomalie pour certains alliages par des recuits convenables ¹, à une température correspondant à la formation de cémentine. En outre, M. Robin a observé que cette anomalie était accompagnée de changements dans les sons émis par des tiges d'acier mises en vibration.

Nous voyons que l'étude des amortissements des oscillations torsionnelles apparaît comme une méthode sensible permettant de déceler des modifications physico-chimiques internes de la matière. Dans le cas particulier des verres et du quartz fondu, et si l'on tient compte des observations que nous venons de faire, cette méthode semble même être plus sensible que le microscope polarisant.

L'hypothèse que nous émettons sur la constitution des milieux isotropes tels que le quartz et les verres pourrait être soumise aux deux vérifications suivantes:

1^o Il faudrait recuire le fil de quartz à une température supérieure à 800° , afin de provoquer la formation plus complète de parties cristallisées; si ce chauffage augmente la quantité

¹ CHEVENARD, *C. R.*, T. 170, p. 1499, 1920.

de tridymite, cela doit se traduire par une plus grande variation du décrément aux environs de 140° . Pour le verre d'Iéna, si vraiment l'anomalie est due à la cristobalite, on devrait constater vers 240° une plus forte anomalie dans le verre ayant subi un long recuit.

2° Il nous semble que la pseudo isotropie des verres et du quartz fondus doit être décelée par l'analyse au moyen des rayons X d'après la méthode de Debye et Scherrer.

CONCLUSIONS

Les résultats expérimentaux de notre étude sur le frottement intérieur dans les verres et le verre de quartz semblent donner quelques éclaircissements sur cette question fort complexe.

La méthode que nous avons employée est en principe la même que celle établie par M. Ch.-E. Guye et ses collaborateurs pour des études analogues. Nos résultats peuvent se résumer comme suit:

1. — La mesure des périodes des oscillations de torsion peut se faire au moyen d'un dispositif basé sur la méthode stroboscopique de Lippmann, méthode dont l'exactitude est de beaucoup supérieure à celle de la méthode des coïncidences.

2. — Le décrément logarithmique des oscillations torsionnelles présente, soit pour les verres, soit pour le verre de quartz, une anomalie manifestée par un minimum dans la courbe de variations thermiques du décrément aux environs de 140° .

3. — Le décrément mesuré immédiatement après un recuit de quelques heures (2 à 3 heures) à 320° est plus faible qu'avant.

4. — Pour le verre, un recuit de plusieurs heures aux environs de 650° semble diminuer les tensions dues à la trempe, de sorte que la variation thermique de λ est alors réversible. Pour le quartz des recuits analogues mais à 800° ne produisent pas un état stable du fil car les variations thermiques de λ aux températures croissantes ne sont pas les mêmes que pour les tempé-

ratures décroissantes. En général l'anomalie est moins accentuée après que le fil a séjourné pendant quelques heures à 320° dans l'appareil d'oscillations. Le plus souvent le minimum du décrétement se trouve aux environs de 140° . Une fois seulement nous l'avons trouvé dans un fil de quartz à 240° .

4° Le second module d'élasticité n'est pas constant mais subit des variations sensibles lorsque la température passe de -20° à 320° . Dans notre verre le module G diminue lorsque la température augmente; pour le quartz, il augmente au contraire. Nous n'avons pas observé de parallélisme entre la variation thermique de G et celle de λ , contrairement à ce qu'avaient trouvé MM. Ch.-E. Guye et Morein pour l'un de leurs fils de quartz entre 20° et 320° .

5. — L'allure de la courbe de variations de λ ne doit pas être due aux seules tensions intérieures. En tenant compte des modifications allotropiques de la silice, il est probable que les verres de même que la silice fondue doivent être envisagés non pas comme des milieux isotropes, mais bien comme des milieux pseudo isotropes. Cette hypothèse a, du reste, été émise par plusieurs expérimentateurs. Les microcristaux prenant naissance au sein de la matière amorphe ne sont pas décelables par le microscope polarisant par le fait qu'aucune orientation n'est privilégiée. Le minimum du décrétement se présentant pour le verre d'Iéna et le verre de silice aux environs de 140° nous fait supposer que si ces cristallisations sont bien réelles, ces microcristaux sont de la tridymite; trois raisons nous le font supposer:

a) C'est à 140° que le coefficient de dilatation de la tridymite subit une brusque augmentation.

b) C'est la tridymite qui est envisagée comme la forme la plus stable de la silice cristallisée. Dans ce cas, il nous faudrait admettre que la température de fusion du quartz lors de la préparation de nos fibres est suffisante pour permettre la formation de cette modification allotropique, ou tout au moins, que le temps de fusion n'est pas assez court pour empêcher les formations de microcristaux.

En outre, étant donné que pour certains verres ce minimum du décrétement λ a lieu vers 240° , il est permis de supposer que dans ce cas c'est de la cristobalite qui s'est formée dans ces

verres, car c'est à cette même température que le coefficient de dilatation de la cristobalite augmente brusquement.

c) La tridymite a plus de chance de se former lors de la préparation des fils car il est certain que la transformation du quartz en cristobalite se fait infiniment plus lentement que sa transformation en tridymite (voir page 52).

7. — Nous suggérons deux genres d'expériences pour vérifier mieux encore ces hypothèses:

a) Un essai de recuit des fils de quartz à une température proche de celle de la formation de la tridymite doit provoquer une augmentation de l'anomalie thermique du décrétement en raison de l'augmentation du nombre ou de l'importance des microcristaux.

b) L'analyse par les rayons X d'après la méthode de DEBYE et SCHERRER doit, semble-t-il, mettre en évidence l'existence de tridymite ou de cristobalite au sein de la masse amorphe.
