

Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 41 (1916)

Artikel: Sur le frottement intérieur des fils de quartz aux basses températures
[suite]
Autor: Guye, C.-E. / Einhorn-Bodzechowski, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-742651>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

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

SUR LE

FROTTEMENT INTÉRIEUR DES FILS DE QUARTZ

AUX BASSES TEMPÉRATURES

PAR

C.-E. GUYE et M. EINHORN-BODZETCHOWSKI

(Suite ¹)

III. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL (²).

§ 1. *Description de l'Appareil.*

L'appareil utilisé pour nos recherches devait satisfaire aux conditions suivantes :

- 1° Il devait être étanche pour tenir un vide assez élevé ;
- 2° Il devait permettre d'établir autour du fil d'expérience une température déterminée, constante pendant la durée des observations.

Pour éviter toute perturbation magnétique l'appareil ne renferme pas de fer ; il est presque entièrement construit en laiton, sauf quelques parties qui seront mentionnées dans la suite.

En allant de haut en bas on peut distinguer les cinq parties suivantes :

- 1° Le support de suspension ;
- 2° la partie centrale, qui comprend un tube, suivant l'axe duquel est suspendu le fil, et un récipient entourant ce tube ;
- 3° la cloche renfermant l'oscilla-

¹) Voir *Archives*, t. XLI, p. 287.

²) Cet appareil a été construit par MM. C.-E. Guye et P. Voïkoff.

teur; 4° la plate-forme de l'appareil munie d'un dispositif spécial pour pouvoir amortir à volonté les oscillations; 5° l'oscillateur.

Pour la description qui suit le lecteur voudra bien se reporter à la figure 2.

a) La tige a porte à son extrémité inférieure une pince américaine p destinée à serrer un petit tube en laiton à l'intérieur duquel est mastiquée l'extrémité du fil d'expérience ff , et cela au moyen de cire à cacheter blanche. Cette tige traverse à frottement dur un manchon mm et permet d'élever, d'abaisser et de faire tourner l'ensemble formé par le fil et l'oscillateur qui lui est suspendu. Le frottement entre la tige et le manchon suffit pour empêcher tout déplacement spontané de l'équipage, mais lorsque l'appareil est réglé on a soin de fixer la tige en serrant la vis V . Le manchon est porté par trois vis P qui traversent l'anneau AA , lequel est soutenu par trois tiges L (dont deux sont représentées sur la figure). Ces vis permettent de centrer le manchon.

b) Le tube en quartz $tttt$ est entouré d'un récipient également en quartz $TTTT$ qui lui est soudé. Ce récipient est un vase Dewar, à double enveloppe vide, argenté intérieurement. Le tube intérieur étant transparent, on peut voir si le fil de suspension est bien centré et si les tiges et les pinces ne touchent pas les parois. Ce tube est mastiqué en haut dans le manchon mm , en bas dans une tubulure de la cloche BB . Le récipient Dewar reçoit le bain destiné à maintenir le fil à la température voulue.

c) La paroi supérieure de la cloche BB est munie d'une tubulure dans laquelle pénètre l'extrémité inférieure du tube $tttt$. La partie cylindrique de cette cloche comporte une petite ouverture FF sur laquelle on a mastiqué une vitre permettant de faire tomber un faisceau lumineux sur le miroir M de l'oscillateur. De plus une tubulure r permet de mettre la cloche en communication avec la machine pneumatique.

La partie inférieure de la cloche est munie d'une large bordure dd , rodée sur la plate-forme de l'appareil et s'appliquant sur celle-ci par un joint en labyrinthe. Ce joint (non indiqué sur la figure) assure une très bonne étanchéité.

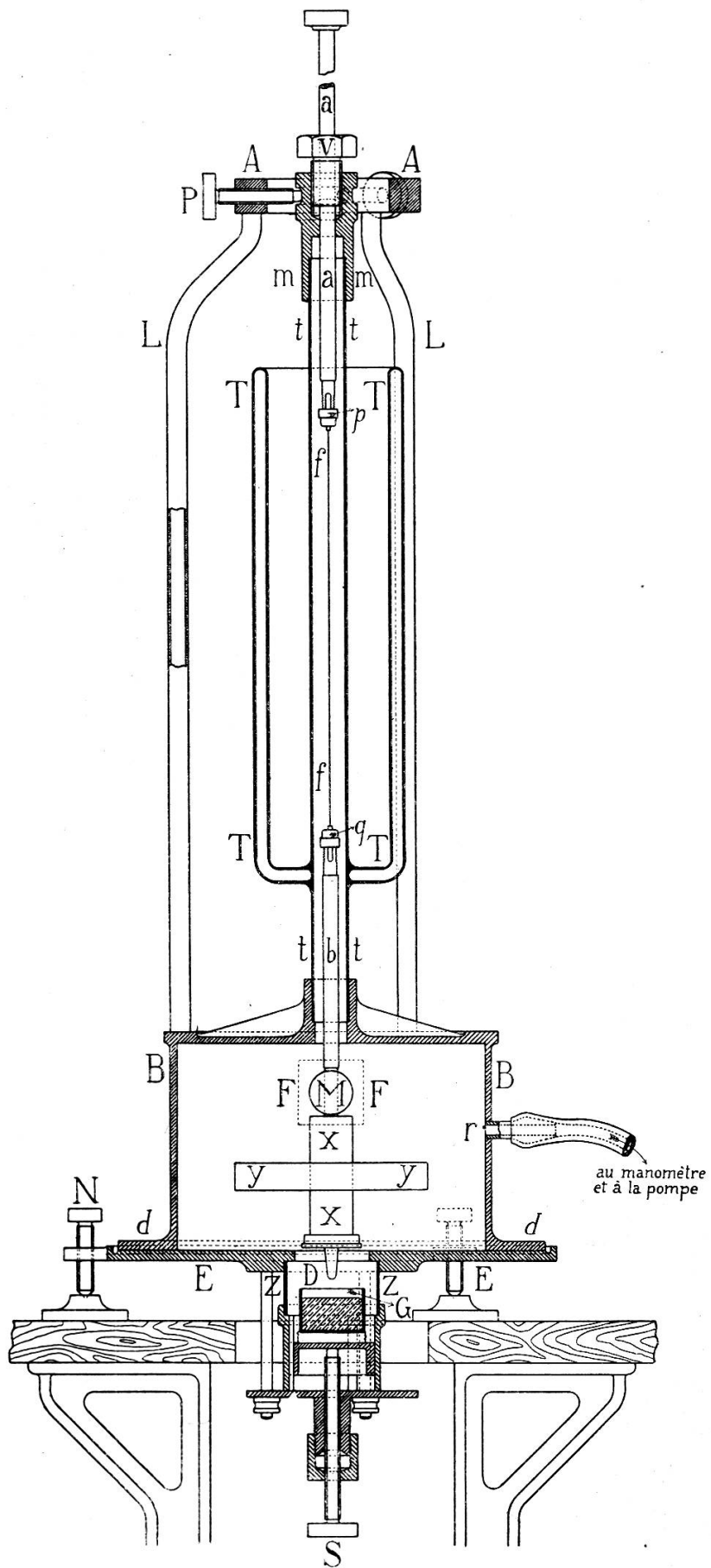


Fig. 2

d) La plate-forme est constituée par un plateau épais EE au milieu duquel se trouve une tubulure renfermant le godet de verre G rempli de mercure. On peut produire l'amortissement du mouvement de l'oscillateur en soulevant le godet au moyen de la vis S de façon à amener le mercure en contact avec une petite tige d'ivoire D fixée à l'extrémité inférieure du système oscillant. Le tube de verre Z mastiqué dans l'orifice du plateau EE permet de voir si l'extrémité de la tige D touche ou non le mercure.

La plate-forme est portée par trois vis calantes N reposant sur trois plaques métalliques. Ces vis permettent de régler la position du fil à l'intérieur de façon à l'amener bien au centre du tube ttt .

e) L'oscillateur se compose essentiellement de deux boîtes cylindriques coaxiales, l'une xx intérieure et l'autre annulaire yy extérieure. Chacune de ces boîtes peut recevoir une masse cylindrique (cylindre plein ou anneau); on peut ainsi faire varier le moment d'inertie du système et par conséquent la durée d'oscillation.

Le fond de la boîte cylindrique xx porte la tige D ci-dessus mentionnée; au couvercle de la dite boîte est soudée une tige b munie d'une pince américaine q servant à recevoir l'extrémité inférieure du fil d'expérience ff .

A cette même tige b est fixé le miroir M qui sert à l'enregistrement des oscillations.

Le vide était obtenu au moyen d'une pompe à enveloppe de Gaede actionnée par un moteur électrique. Il était ainsi facile de maintenir à l'intérieur de l'appareil une pression inférieure à un millimètre de mercure. Pour la mesure des pressions nous avons utilisé un baromètre tronqué.

Le thermostat était formé par le récipient Dewar en quartz $TTTT$ rempli d'un mélange réfrigérant ou d'une substance appropriée dont la température restait constante pendant la durée des expériences.

Le diamètre du tube intérieur ttt est seulement de 16 mm. Ce tube étant complètement entouré par le bain et la masse du

fil d'expérience étant extrêmement petite l'équilibre de température s'établit très rapidement.

Dans des expériences préliminaires nous avons constaté par des mesures de résistance électrique, qu'un fil métallique avait dans ces conditions la même température que lorsqu'il est plongé directement dans le bain, il n'est peut-être pas inutile de rappeler à ce propos que la conductibilité thermique du quartz est près de dix fois plus grande que celle du verre.

Nous avons fait dans le même but la détermination du décrement logarithmique du fil aux températures de la glace et de l'air liquide, 30, 60 et 90 minutes après l'introduction de la substance réfrigérante, et nous avons trouvé, dans les trois cas, la même valeur du décrement. On peut donc affirmer que le fil se trouve bien à la température du bain au moment des expériences.

Cependant, par mesure de prudence, nous avons préféré attendre toujours une heure avant de commencer les observations, pour que l'équilibre de l'ensemble de tout l'appareil soit sûrement atteint.

Pour étudier le fil à la température de la salle, nous nous sommes bornés à verser de l'eau dans le récipient Dewar; cette masse d'eau qui se trouve protégée contre les échanges de chaleur, ne varie que d'une très petite fraction de degré pendant la durée de l'expérience. On réalise donc bien de cette façon une enceinte de température pratiquement constante.

Dans les expériences faites à zéro, le récipient fut rempli de glace pilée humectée avec un peu d'eau refroidie préalablement.

La neige d'acide carbonique mélangée avec un peu d'alcool forme une pâte dont la température est de -79° ; cette température se communique facilement au tube traversant le récipient ainsi qu'au fil grâce au bon contact entre le mélange réfrigérant et les parois du tube.

Enfin, la plus basse température de nos expériences fut réalisée au moyen de l'air liquide dont la température était habituellement de -194° .

Dans un certain nombre d'expériences nous avons fait usage

d'un mélange réfrigérant dont la température était de -45° . La préparation de ce mélange est décrite chap. V, § 1.

Un thermomètre à pentane nous a servi à mesurer les basses températures.

Les différents moments d'inertie ont été réalisés en mettant, soit un anneau de laiton dans la boîte cylindrique extérieure *yy*, soit un cylindre de plomb dans la boîte intérieure *xx*. *Le cylindre et l'anneau avaient la même masse M* de 85,6 grammes; le rayon du cylindre ρ était de 0,94 cm.; l'anneau avait un rayon extérieur R de 4,34 cm. et un rayon intérieur r de 3,36 cm.

En employant les formules :

$$I_c = \frac{M}{2} \rho^2 \quad \text{et} \quad I_a = \frac{M}{2} (R^2 + r^2),$$

on trouve pour le moment d'inertie du cylindre :

$$I_c = 75,64 \text{ gr. cm}^2.$$

et pour celui de l'anneau :

$$I_a = 2574,71 \text{ gr. cm}^2.$$

Pour déterminer le moment d'inertie I_0 de l'oscillateur on fait deux observations, la première en introduisant dans l'oscillateur le cylindre de plomb, et la seconde en y introduisant l'anneau après avoir retiré le cylindre; on obtient ainsi les deux périodes T_1 et T_2 . En utilisant l'équation (2), très approximativement exacte, on trouve :

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{I_c + I_0}{I_a + I_0}}.$$

D'où l'on tire :

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

En introduisant dans cette relation les valeurs observées :

$T_1 = 3,75 \text{ sec.}$ et $T_2 = 7,30 \text{ sec.}$, on obtient :

$$\begin{aligned} I_0 &= 821,45 \text{ gr. cm}^2, \\ I_1 &= 897,09 \text{ gr. cm}^2, \\ I_2 &= 3400,16 \text{ gr. cm}^2. \end{aligned}$$

I_1 et I_2 désignant les moments d'inertie respectifs de l'oscillateur chargé par le cylindre ou par l'anneau.

Insistons encore sur le fait que *ce procédé déjà utilisé dans des expériences antérieures permet de changer le moment d'inertie de l'oscillateur sans modifier ni la charge du fil ni la forme extérieure du système.*

§ 2. Préparation des fils.

En ce qui concerne les fils de verre utilisés dans nos expériences, ils provenaient tous d'une même tige de verre; nous avons choisi parmi les fils ceux qui étaient les plus réguliers. Les fils de quartz nous ont été fournis par la fabrique de Heraeus à Hanau. Leur longueur était de 30 à 40 centimètres, tandis que nous n'avions besoin que d'une longueur de 20, il nous était donc possible de choisir dans chaque fil la portion qui se rapprochait le plus de la forme cylindrique.

Les diamètres ont été mesurés au moyen d'un microscope à micromètre oculaire. Comme les fils ne sont pas absolument cylindriques et n'ont pas exactement le même diamètre sur toute leur longueur, nous n'avons pris en considération que leur diamètre moyen à titre d'indication.

Les fils de verre et de quartz ne pouvant pas, à cause de leur fragilité, être fixés directement dans les pinces, nous avons d'abord scellé les deux bouts du fil dans deux très petits tubes de laiton au moyen d'une cire à cacheter blanche très adhérente. Il était indiqué de contrôler après chaque série d'expériences si ces joints délicats n'étaient pas endommagés.

Avant les expériences les fils ont été étuvés dans un bain de sable : le fil est introduit dans un tube de verre d'Iéna qu'on place horizontalement dans une rigole de laiton remplie de sable. Après avoir recouvert le tube d'une couche de sable, on chauffe la rigole au moyen d'une rangée de brûleurs de gaz placée au-dessous.

Notons encore que les fils ont été observés au microscope polarisant, avant et après avoir servi aux expériences, et ont été trouvés isotropes et homogènes sur toute leur longueur.

§ 3. *Enregistrement photographique des oscillations* ⁽¹⁾.

A une distance de 2^m,30 du miroir de l'oscillateur était disposé un écran muni d'une fente verticale de largeur réglable. Cette fente était éclairée par le filament d'une lampe Nernst ⁽²⁾. Le faisceau lumineux émanant de la fente, après avoir traversé un objectif photographique, se réfléchissait sur le miroir M fixé à l'oscillateur et formait une image réelle de la fente à une distance de 1^m,50 de l'appareil. A l'endroit où se forme l'image on place l'appareil enregistreur qui comporte un tambour cylindrique, enfermé dans une caisse munie d'une fente horizontale, ce tambour peut tourner autour d'un axe parallèle à la fente. Autour du tambour est enroulée une feuille de papier photographique de grande sensibilité. Un mécanisme d'horlogerie imprime au cylindre un mouvement de rotation d'une vitesse convenable.

L'image réfléchie de la fente verticale tombe sur la fente horizontale et produit ainsi par son intersection une très petite tache lumineuse sur le papier photographique. L'oscillation du miroir composé avec la rotation du cylindre donne lieu à un déplacement du point lumineux et l'image inscrite sur le papier photographique est, le mouvement de rotation étant supposé uniforme, celle d'une sinusoïde dont les ordonnées sont proportionnelles aux angles de torsion et les abscisses proportionnelles au temps.

Le mouvement de rotation du cylindre est uniformisé par la résistance de l'air, grâce à des ailettes adaptées à l'arbre du mécanisme d'horlogerie. En changeant la grandeur de la surface ou l'inclinaison des ailettes on peut faire varier la résistance opposée par l'air à la tension du ressort et modifier ainsi la vitesse de rotation du tambour enregistreur. Le mouvement de ce mécanisme, quelque peu primitif, n'est pas très uniforme,

¹⁾ Ce dispositif d'enregistrement photographique a été employé par MM. C.-E. Guye et V. Fréedericksz.

²⁾ Il est recommandable d'amorcer l'allumage de la lampe Nernst à l'aide d'un brûleur à gaz.

ce qui, du reste n'a pas une influence appréciable sur l'exactitude des résultats si l'on se borne à étudier l'amortissement par les elongations extrêmes.

Après avoir développé et fixé l'image photographique, on détermine les amplitudes en posant sur le papier une lourde règle en laiton divisée en demi millimètre, permettant de mesurer les longueurs à 0,1 ou 0,2 mm. près. Les longueurs proportionnelles aux amplitudes qui interviennent dans nos mesures varient entre 9 et 28 centimètres. L'erreur de lecture ne peut donc dépasser en aucun cas 0,2 %.

§ 4. Mode opératoire.

Pour suspendre le fil d'expérience à l'intérieur de l'appareil on commence par soulever l'ensemble formé par la cloche *BB* et la partie supérieure de l'appareil et l'on place le tout sur deux petites consoles fixées au mur, à 40 cm, au dessus de la plate-forme *EE* de l'appareil. Ensuite on fait descendre la tige *a*, jusqu'à ce que la pince *p* sorte par la partie inférieure de la cloche. On serre alors le petit tube de laiton fixé à l'une des extrémités du fil *ff* dans la pince et on remonte la tige, l'autre extrémité du fil restant encore hors de la cloche. On suspend alors l'oscillateur au moyen de la pince *q* à l'extrémité inférieure du fil *ff* à laquelle est scellée un petit tube de laiton destiné à être serré par la pince. On remonte ensuite la tige *a*, jusqu'à ce que l'extrémité *D* de l'oscillateur rentre dans la cloche *BB*. Ceci fait, on dispose la cloche sur la plate-forme. Le réglage de la position du miroir *M* fixé à la tige *b* de l'oscillateur se fait alors en haussant ou en abaissant prudemment ainsi qu'en tournant lentement la tige *a*.

Après avoir immobilisé cette tige *a* au moyen de la vis *V*, on porte le fil à la température voulue et on fait le vide dans la cloche. Tout est alors prêt pour l'expérience.

Pour mettre en mouvement l'équipage mobile on se sert d'un électro-aimant que l'on peut exciter un instant par le courant d'un accumulateur. L'électro-aimant agit sur deux petits rivets en fer, fixés à l'intérieur de la boîte *yy* de l'oscillateur. Après

avoir placé l'électro-aimant dans la position convenable, on ferme un instant le courant; l'oscillateur reçoit une impulsion grâce à l'attraction momentanée exercée sur les deux rivets. On éloigne alors l'électro-aimant à une distance suffisante pour éviter toute action que pourrait exercer son magnétisme résiduel; on met alors en marche le tambour enregistreur et on inscrit les oscillations.

Remarque. — Insistons encore sur le fait que nous avons souvent noté la position d'équilibre de l'oscillateur avant et après une expérience; dans aucun cas nous n'avons pu constater un changement indiquant l'existence d'une déformation résiduelle; nous n'avons travaillé d'ailleurs qu'avec de petites amplitudes.

IV. RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES

Fils de quartz

§ 1. *Modification permanente des fils de quartz sous l'influence d'une basse température.* — Tous les fils de quartz ont été traités exactement de la même façon. Après les avoir soumis à l'action de la charge de l'oscillateur, on a attendu deux jours avant de commencer les observations définitives. Pendant ce temps on a fait effectuer au fil un grand nombre d'oscillations pour produire l'« accomodation » (voir chap. I).

Nous avons étudié les oscillations d'abord à la température de la salle, puis à la température de la glace, à celle de la neige carbonique et à celle de l'air liquide. Des variations de température aussi considérables peuvent évidemment produire une modification permanente de la structure physique ou chimique du corps, et il nous a paru indispensable d'examiner d'abord cette question.

Dans ce but nous avons alterné les déterminations faites aux plus basses températures avec celles effectuées à zéro, et nous avons constaté que déjà l'abaissement de température à -79° produit une modification durable de la matière du fil. Après avoir maintenu le fil pendant un certain temps à cette température, on trouve en effet une augmentation du décrement

logarithmique lorsqu'on revient à la température de la glace fondante. Cet effet est encore plus marqué si l'on refroidit le fil à -194° . Dans ce dernier cas on constate une augmentation du décrement logarithmique dont l'importance atteint 25 à 30 % de la valeur primitive.

Il est nécessaire d'admettre qu'il s'agit bien là d'une modification permanente qui se produit lors du premier refroidissement, car lorsqu'on refroidit progressivement un *fil neuf*, le décrement logarithmique passe par une série de valeurs décroissantes, notablement plus petites que celles qu'il prend lorsqu'on repasse par les mêmes températures en sens contraire, pour revenir finalement à la température primitive. Nous n'avons d'ailleurs pas réussi à ramener le fil dans son état initial, ni même à modifier la valeur que prend le décrement logarithmique à la suite du premier refroidissement à -194° . De même le changement de structure ne semble pas disparaître avec le temps; du moins la valeur du décrement n'avait-elle nullement changé au bout de cinq jours; la modification résultant d'un premier refroidissement peut donc être considérée comme durable.

D'autre part, un étuvage prolongé a dans certains cas pour effet de rendre le fil cassant, si après l'avoir porté à une haute température on le refroidit ensuite. Ce fait doit être probablement attribué à une cristallisation partielle du verre de quartz à température élevée⁽¹⁾.

¹⁾ On sait en effet que le quartz amorphe est souvent assimilé, comme les verres, à un liquide surfondu (voir G. Tammann, « Schmelzen und Kristallisieren », Leipzig, 1903). Or la vitesse de cristallisation d'un liquide surfondu (mis en présence d'un cristal qui peut être aussi petit qu'on veut) est, pour des températures pas trop éloignées du point de congélation, à peu près proportionnelle à la différence entre la température de congélation et la température actuelle du corps. Si la différence de température croît, la vitesse de cristallisation augmente, passe par un maximum et diminue ensuite très rapidement. Cela pourrait expliquer le fait qu'on peut conserver très longtemps des fils de quartz à la température ordinaire, sans qu'on puisse déceler, au moyen du microscope polarisant, la moindre trace d'une structure cristalline. Mais une élévation suffisante de température, par contre (étuvage), favoriserait la cristallisation, puisqu'elle rapprocherait les fils de quartz de la température pour laquelle la vitesse de cristallisation est maximum.

Nous avons répété les observations précédentes sur plusieurs fils, et nous avons toujours constaté qu'un fil, après avoir passé par la température de -194° , ne subit plus de variation du décrement logarithmique lorsqu'on le soumet alternativement à des températures plus élevées, et à celle de l'air liquide qui fut la plus basse dans nos expériences. Pour obtenir des résultats comparables, il est donc indiqué de ne considérer que les valeurs du décrement observées après un premier refroidissement préalable du fil à -194° .

Dans nos expériences définitives nous avons procédé de la façon suivante : nous avons effectué une première observation à zéro, pour pouvoir contrôler l'exactitude des constatations précédentes ; puis le fil fut refroidi à la température de l'air liquide. Ceci fait, on pouvait faire varier la température, soit en montant soit en descendant, on était sûr alors de retrouver la même valeur du décrement logarithmique lorsqu'on revenait à la même température.

§ 2. *Influence de la température sur le décrement logarithmique λ .* — Dans toutes nos expériences sur des fils de quartz nous avons trouvé la même allure de la variation du décrement avec la température, quelles que furent d'ailleurs les dimensions des fils étudiés. Le décrement décroît d'abord assez rapidement jusqu'au voisinage de la température de la neige carbonique ; à partir de cette température, la diminution de λ se ralentit considérablement, et pour des températures plus basses la variation du décrement en fonction de la température est extrêmement faible. La table et les courbes ci-après qui résument les résultats de nos observations mettent ces faits en évidence.

Les chiffres inscrits dans la première ligne horizontale du tableau I indiquent les valeurs du décrement à la température de 0° , avant que le fil fût refroidi pour la première fois à -194° . Ces chiffres ne se rapportent donc pas à l'état définitif du fil, et ne seront pas pris en considération pour la discussion ultérieure. Nous avons séparé par un trait ces valeurs des suivantes qui se rapportent aux températures de -194° , -79° , 0° , et à celle de

TABLEAU I. — *Variation du décrement logarithmique en fonction de la température. Fils de quartz*

TEMPÉ- RATURE ϑ	Longueurs = 18.5 cm. ;				Moment d'inertie = 897 gr. cm ² ;				Pression dans l'appareil = 1 mm. Hg			
	Fil III ; $d = 0.51$ mm.		Fil IV ; $d = 0.55$ mm.		Fil V ; $d = 0.49$ mm.		Fil VI ; $d = 0.48$ mm.					
	Période T (sec.)	Décr. log. λ	Période T (sec.)	Décr. log. λ	Période T (sec.)	Décr. log. λ	Période T (sec.)	Décr. log. λ	Période T (sec.)	Décr. log. λ	Période T (sec.)	Décr. log. λ
0°	1.793	0.00198	1.476	0.00129	1.866	0.00131	1.907	0.00135				
— 194°	1.811	0.00073	1.500	0.00058	1.897	0.00067	1.930	0.00065				
— 79°	1.798	0.00082	1.484	0.00064	1.877	0.00072	1.915	0.00069				
0°	1.793	0.00250	1.477	0.00165	1.866	0.00161	1.907	0.00168				
ordinaire	18° 1.791	0.00434	17° 1.475	0.00296	21° 1.865	0.00331	20° 1.905	0.00346				
— 194°	—	—	1.500	0.00058	1.897	0.00065	—	—				
0°	—	—	1.477	0.00169	1.866	0.00160	—	—				

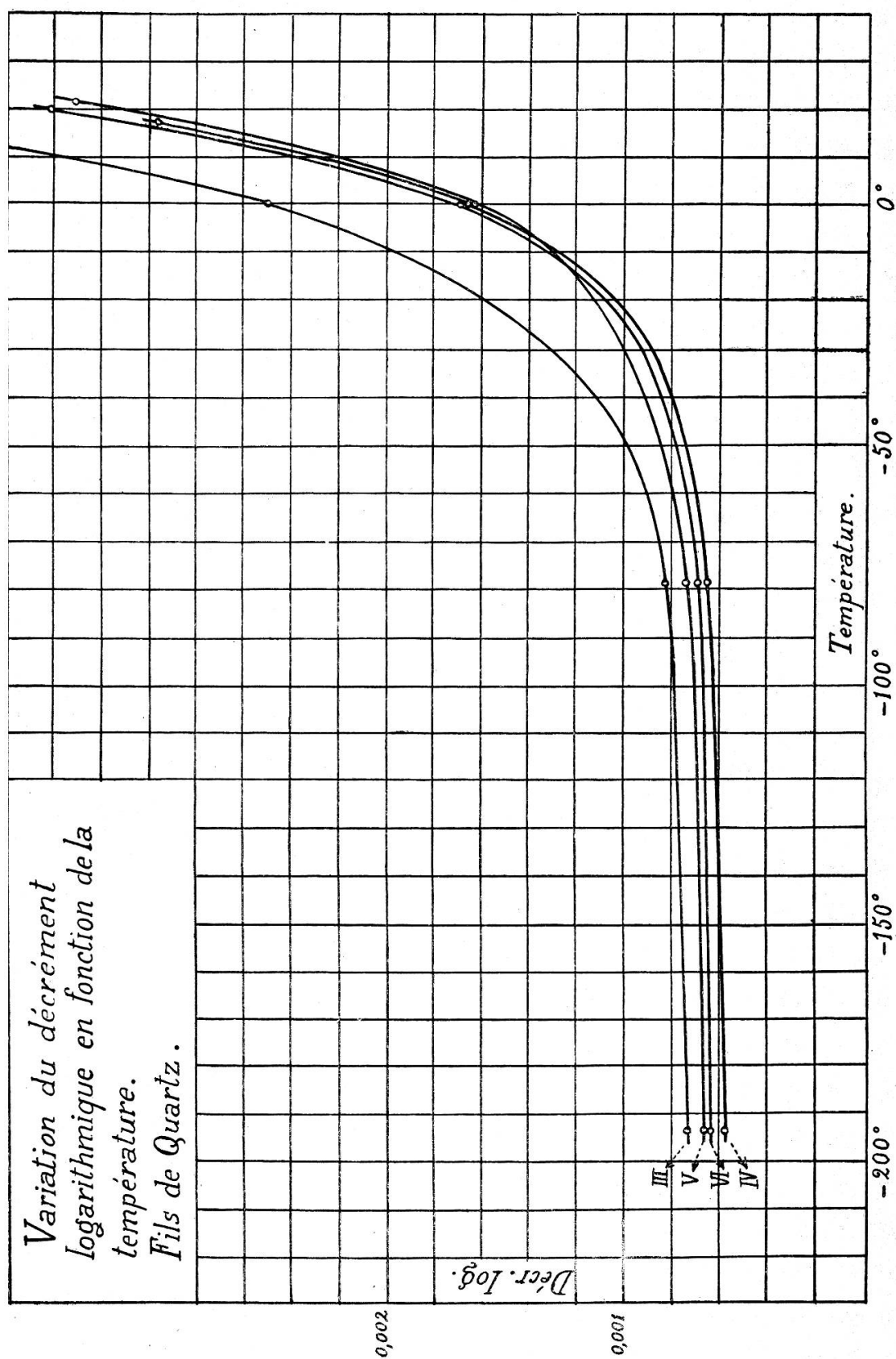


Fig. 3

la salle. Ce second groupe de chiffres correspond à l'état définitif et sont par conséquent comparables. Les deux dernières lignes renferment les résultats obtenus en répétant les observations à -194° et à 0° . On reconnaît que ces valeurs s'accordent bien avec celles qui précèdent. Cela prouve que le fil, après avoir été porté à 194° ne subit plus de changement ultérieur de structure. Dans les courbes de la fig. 3 on n'a représenté que les valeurs définitives du décrement logarithmique.

Aucun des fils étudiés n'avait été utilisé antérieurement. Les quatre fils pour lesquels nous donnons les résultats avaient tous même longueur, celle qui nous était imposée par les dimensions de notre appareil (voir fig. 2), leurs diamètres par contre sont un peu différents. Ces fils se distinguent néanmoins par le fait suivant. Les fils III et IV avaient séjourné pendant plus d'une année dans le laboratoire; les fils V et VI par contre étaient fraîchement préparés ⁽¹⁾. Cependant la variation du décrement en fonction de la température présente très sensiblement la même allure pour tous les fils; de plus, si l'on fait abstraction du fil III, on constate également qu'à la température de la salle et à zéro, le décrement est à peu près le même pour les différents fils.

Nos observations ne vérifient pas exactement la théorie de Boltzmann suivant laquelle le décrement logarithmique devrait être indépendant du diamètre du fil. Il faut toutefois noter que nos chiffres ne s'écartent pas beaucoup de ce résultat, et il est fort possible que le petit désaccord qui subsiste puisse être attribué au fait que la matière des différents fils n'est pas absolument identique, ou plutôt à ce que les fils n'ont pas une forme rigoureusement cylindrique.

Connaissant le décrement λ on peut calculer la quantité d'énergie dissipée pendant une oscillation du fil (voir chap. II, § 2). Cette perte d'énergie est exprimée par la formule (12) :

$$\Delta P = 4\pi^2 \alpha_n^2 \lambda \frac{I}{T^2} .$$

¹⁾ Les fils de quartz nous ont été fournis par W. C. Heräus, Hanau.

En utilisant par exemple les valeurs relatives au fil IV à la température de l'air liquide, on a :

$$\begin{aligned} \alpha_n &= 0,025, & I &= 897 \text{ gr. cm}^2, \\ \lambda &= 0,00058, & T &= 1,5 \text{ sec.} \end{aligned}$$

d'où :

$$\Delta P = 0,0057 \text{ ergs.}$$

Ce calcul présente un certain intérêt parce qu'il montre que la perte d'énergie est très petite ⁽¹⁾. On peut se demander même si cette faible dépense d'énergie ne doit pas être attribuée, en partie du moins, à d'autres causes qu'au frottement intérieur du fil. Il semble en effet difficile, sinon impossible, de protéger suffisamment le fil contre toute transmission de l'énergie des oscillations au support; d'autre part, le frottement dû au résidu gazeux de l'appareil n'est peut-être pas absolument négligeable, de sorte que le chiffre indiqué représente en réalité la *limite supérieure* de la perte d'énergie attribuable au frottement intérieur à la température de l'air liquide pour l'oscillation considérée.

§ 3. *Influence de la période des oscillations.* — Pour les fils IV et V nous avons effectué des observations avec deux moments d'inertie différents, en maintenant pour le reste rigoureusement constantes les conditions de l'expérience, c'est-à-dire la charge supportée par le fil, le degré du vide et la forme extérieure du système suspendu. Nous avons utilisé les deux moments d'inertie :

$$I_1 = 897 \text{ gr. cm}^2 \quad \text{et} \quad I_2 = 3400 \text{ gr. cm}^2.$$

Une première série d'observations était effectuée avec le petit moment d'inertie I_1 , puis une seconde avec le grand moment d'inertie I_2 . Nous avons alors répété à la température de la glace, l'observation des oscillations du fil, soumis à l'influence du plus petit moment d'inertie I_1 , afin de vérifier l'absence de

¹⁾ C'est approximativement l'énergie de $\frac{1}{200}$ de milligrammes tombant d'une hauteur de un millimètre.

toute déformation résiduelle et de tout dérangement de la suspension.

Les tableaux II et III et les courbes qui suivent résument les résultats de ces expériences.

Les courbes relatives aux deux moments d'inertie ne se superposent nulle part, mais elles se rapprochent beaucoup lorsque la température monte.

Il importe de rappeler à ce propos que d'après la théorie de M. W. Voigt ⁽¹⁾, l'expression :

$$d = \frac{\lambda T}{2\pi^2} \text{ } ^{(2)}$$

doit être constante; cette théorie attribuant, comme nous l'avons déjà fait remarquer, une valeur constante au produit λT . Suivant Boltzmann ⁽³⁾ par contre, c'est le décrément logarithmique λ qui doit présenter une valeur constante quelle que soit la période T . On voit donc que ni l'une ni l'autre de ces théories ne semble s'appliquer rigoureusement aux fils de quartz, mais on reconnaît qu'aux températures élevées le décrément tend à se conformer à la théorie de Boltzmann, puisque les courbes relatives aux deux moments d'inertie tendent à se confondre dans ces conditions.

Aux basses températures, par contre, le décrément diminue sensiblement lorsque la période augmente; toutefois le produit λT n'est pas constant; il augmente en même temps que T (voir tableau IV). Il semble donc qu'aux basses températures, on tende à se rapprocher de la loi établie par M. Voigt; ce qu'avaient précédemment observé MM. C.-E. Guye et V. Fréedericksz dans des expériences sur des fils métalliques.

Remarquons d'autre part que M. Voigt lui-même a observé, dans des expériences faites avec des prismes, que le produit λT augmente avec la période des oscillations. La loi $\lambda T = \text{const}$ n'est donc certainement pas exacte, mais on serait tenté de lui

¹⁾ *Loc. cit.*, chap. I.

²⁾ La constante d n'est autre que le rapport des deux constantes F et E , voir l'équation (8a).

³⁾ *Loc. cit.*, chap. I.

TABLEAU II

*Influence de la période sur le décrement logarithmique**Fil de quartz IV*

$l = 18.5 \text{ cm. ; } d = 0.55 \text{ mm. ; } p = 1 \text{ mm. Hg}$				
TEM- PÉRATURE ϑ	$I_1 = 897 \text{ gr. cm}^2$		$I_2 = 3400 \text{ gr. cm}^2$	
	Période T (sec.)	Décr. log. λ	Période T (sec.)	Décr. log. λ
-194°	1.500	0.00058	2.921	0.00046
-79°	1.484	0.00064	2.901	0.00054
0°	1.477	0.00165	2.885	0.00157
ordinaire	$\overline{17^\circ}$ 1.475	0.00296	$\overline{19^\circ}$ 2.881	0.00308

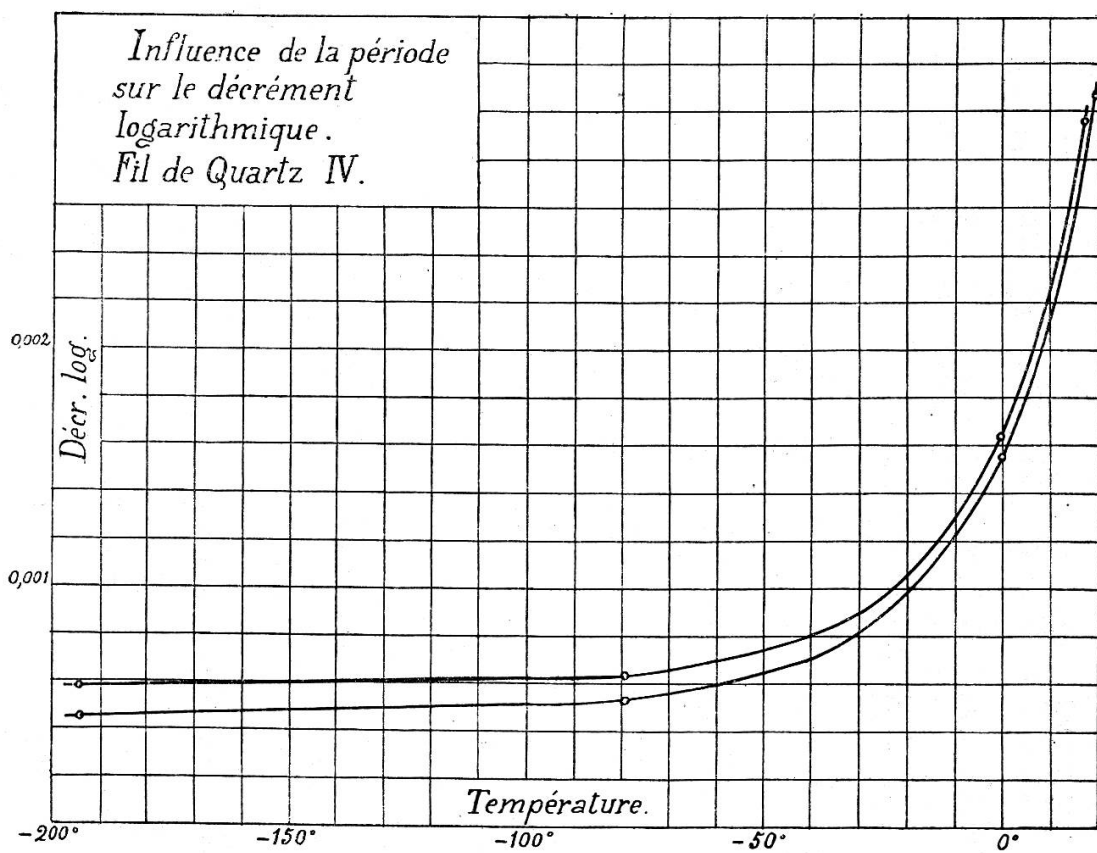


Fig. 4

TABLEAU III

Influence de la période sur le décrement logarithmique
Fil de quartz V

$l = 18.5 \text{ cm. ; } d = 0.49 \text{ mm. ; } p = 1 \text{ mm. Hg}$				
TEM- PÉRATURE ϑ	$I_1 = 897 \text{ gr. cm}^2$		$I_2 = 3400 \text{ gr. cm}^2$	
	Période T (sec.)	Décr. log. λ	Période T (sec.)	Décr. log. λ
-194°	1.897	0.00067	3.689	0.00057
-79°	1.877	0.00072	3.666	0.00062
0°	1.866	0.00161	3.645	0.00156
21°	1.865	0.00331	3.643	0.00323

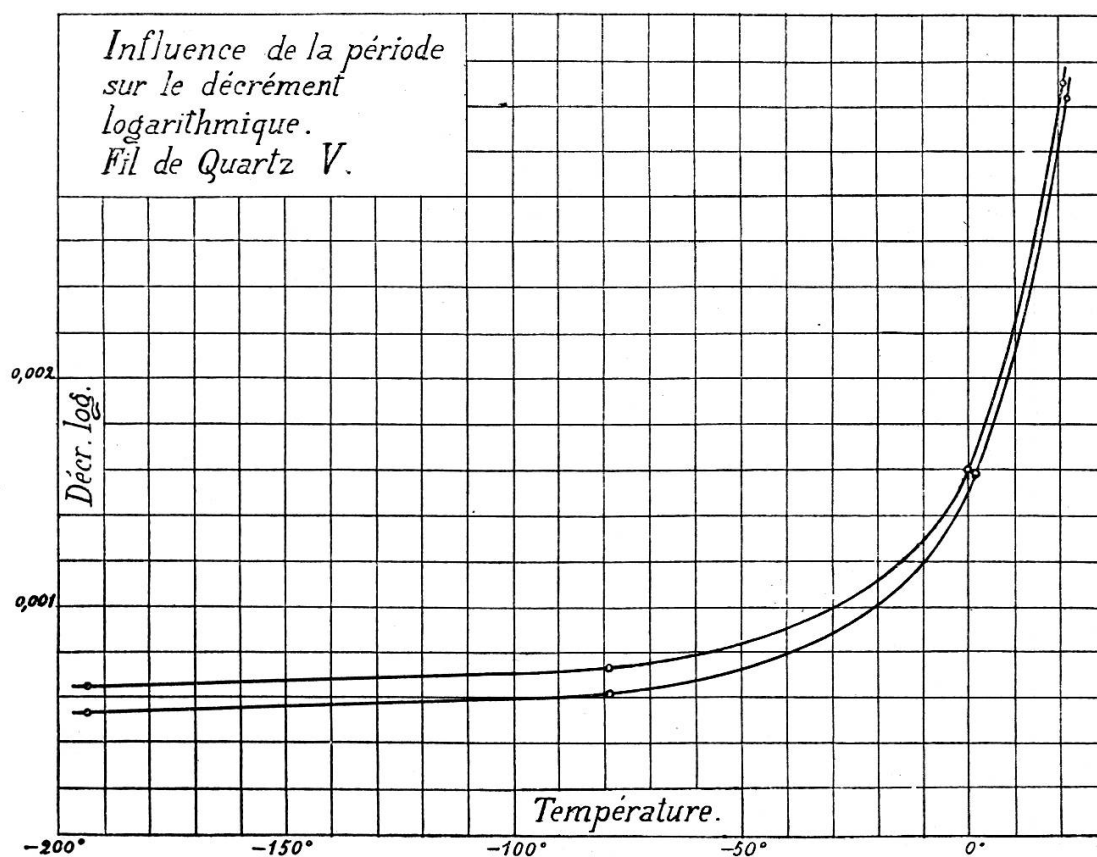


Fig. 5

attribuer la signification d'une loi limite applicable au « corps solide parfait ». Aux basses températures, les corps se rapprocheraient de l'état solide parfait, tandis qu'aux températures élevées les conditions de cet état ne se trouvent pas même approximativement réalisées. La loi de Boltzmann serait alors considérée comme une seconde loi limite qui s'appliquerait aux températures élevées.

TABLEAU IV

Température ϑ	Mom. d'inertie $I_1 = 897$ $I_2 = 3400$	Période T	Déc. log. λ	λT
+ 17°	I_1	1.475	0.00296	0.00436
	I_2	2.881	0.00288	0.00830
0°	I_1	1.477	0.00165	0.00243
	I_2	2.885	0.00157	0.00453
— 79°	I_1	1.484	0.00065	0.00096
	I_2	2.901	0.00054	0.00156
— 194°	I_1	1.500	0.00058	0.00087
	I_2	2.921	0.00046	0.00134

Si on se place au point de vue de la théorie d'un frottement intérieur fonction de la vitesse, on peut interpréter la façon dont le fil se comporte aux basses températures de la manière suivante : Si la durée d'oscillation augmente, la vitesse de déformation diminue. Envisageons le cas limite d'une durée d'oscillation infiniment grande, c'est-à-dire d'une vitesse de déformation infiniment petite. Dans ces conditions, le fil passerait successivement par une série d'états d'équilibre, et la transformation serait entièrement réversible, parce qu'à chaque instant les forces qui produisent la déformation seraient égales aux forces moléculaires qui s'y opposent. On n'aurait alors aucune dissipation d'énergie et par conséquent un décrement nul. A mesure qu'on s'éloigne de plus en plus de ces conditions limites, qui sont d'ailleurs irréalisables, l'irréversibilité de la transformation augmente, et se traduit par une

dépense d'énergie de plus en plus grande, et par un décrement λ qui va en augmentant.

Ces considérations sont analogues à celles qui montrent l'irréversibilité de tout cycle de transformation accompagné de phénomènes thermiques et parcouru avec une vitesse finie.

Le fait que le décrement λ augmente avec la rapidité des oscillations peut donc trouver son explication dans des raisons d'ordre thermodynamique. Il resterait à expliquer pourquoi cette augmentation serait beaucoup plus sensible aux basses températures qu'aux températures élevées.

Il est probable que l'établissement de l'équilibre se fait bien plus rapidement aux températures élevées qu'aux basses températures. Ainsi par exemple la vitesse d'une réaction chimique devient double pour une élévation de température de cinq à dix degrés. L'élévation de la température modifie donc profondément les forces moléculaires, et on peut admettre qu'elle augmente beaucoup la rapidité avec laquelle les molécules passent d'une configuration à l'autre. On peut alors considérer comme « infiniment lente » une oscillation qui, aux basses températures, produit l'effet d'une oscillation rapide. Malgré cela, la dissipation d'énergie en valeur absolue est plus importante aux températures élevées qu'aux basses températures, mais cette grande perte d'énergie, qui se montre indépendante de la rapidité des déformations, peut alors être attribuée à une autre cause, l'importance de l'agitation moléculaire aux températures élevées.

D'ailleurs, pour élucider des phénomènes aussi complexes, il serait naturellement indispensable de compléter nos observations dans différentes directions. Il serait désirable, en particulier, en ce qui concerne les basses températures, de réduire davantage la vitesse de déformation, d'opérer avec des durées d'oscillation beaucoup plus grandes que celles qui ont été réalisées dans nos expériences. Toutefois la réalisation de ces expériences n'aurait pu être effectuée qu'en adoptant d'autres dispositifs ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Pour obtenir une plus grande durée d'oscillation il faut augmenter le moment d'inertie, mais l'exiguité de l'espace disponible ne permet

§ 4. *Influence de l'amplitude.* — Que l'on adopte la théorie de Boltzmann ou celle de Voigt, l'amplitude ne devrait avoir aucune influence sur le décrémentation dans nos conditions expérimentales. Les considérations que nous avons rappelées n'étant applicables qu'au cas des petites amplitudes. Cette condition restrictive est satisfaite dans nos expériences, puisque nous n'avons jamais eu des amplitudes supérieures à quelques degrés.

Nos expériences s'accordent donc avec la théorie en ce sens que *l'influence de l'amplitude sur le décrémentation est certainement très faible*; elles s'accordent de même avec la conclusion que C.-E. Guye et S. Vassileff ⁽¹⁾ ont tirée de leurs observations sur des fils de verre à haute température, ainsi qu'avec nos propres expériences, faites également avec des fils de verre à plus basse température (voir chap. V, § 4).

Nous n'avons étudié l'influence de l'amplitude sur le décrémentation qu'à la température de la salle et à celle de la glace. Aux basses températures, le décrémentation logarithmique est tellement petit pour des fils de quartz qu'il faut étendre la durée des observations à plus d'une heure pour obtenir une diminution d'amplitude convenable.

Dans ces conditions l'étude de l'effet dû à une variation de

pas une très grande augmentation du rayon de giration du système suspendu; il faudra donc agir sur le poids du système. Mais d'autre part on ne peut augmenter la charge portée par le fil sans risquer de provoquer des déformations permanentes, à moins d'utiliser un fil de plus grand diamètre. Ce dernier procédé ne permet pas de profiter de l'augmentation du moment d'inertie, parce que la durée d'oscillation varie en raison inverse du carré du diamètre, donc en raison inverse du poids correspondant à la limite d'élasticité du fil. On voit qu'on ne peut faire varier de beaucoup le poids de l'équipage, ce qui restreint considérablement les limites de l'augmentation possible du moment d'inertie et de la durée d'oscillation.

En outre, si la durée d'oscillation était plus grande et le décrémentation plus petit l'inévitable transmission d'une certaine fraction de l'énergie, au support et aux objets environnants, présenterait vraisemblablement une importance relative de plus en plus considérable. Cette perte d'énergie est considérée comme négligeable tant que le frottement intérieur est relativement grand; mais si le décrémentation logarithmique est très faible, cet effet peut entraîner des erreurs dont la grandeur est difficile à évaluer.

¹⁾ *Loc. cit.*

l'amplitude rencontre des difficultés pratiques très grandes. D'ailleurs il eut été bien difficile avec notre dispositif (sauf dans le cas de la glace fondante), de maintenir rigoureusement constante la température pendant un intervalle aussi long, et d'autre part la chance d'intervention de perturbations extérieures, dont l'influence n'est peut-être pas négligeable aux basses températures, croît avec la durée des expériences.

Notons enfin que les erreurs de mesure, qui tiennent à l'impression photographique un peu diffuse produite par la trace lumineuse, ont une plus grande importance aux basses températures qu'aux températures élevées. En effet, si la température est basse, le décrement est petit, et par conséquent les amplitudes servant à sa détermination sont très peu différentes. L'importance relative de l'erreur d'appréciation devient alors considérable, et l'interprétation des très petites variations du décrement logarithmique qui résultent des observations devient aléatoire.

La table suivante indique, à titre d'exemple, les résultats des observations effectuées à la température ordinaire. Nous avons calculé le décrement λ pour vingt oscillations d'après la formule (9b) :

$$\lambda = \frac{1}{20} \log \text{nat} \frac{a_n}{a_{n+20}}$$

et nous avons pris comme amplitude correspondante à cette valeur de λ la moyenne arithmétique des amplitudes de cet intervalle.

TABLEAU V

Variation du décrement logarithmique avec l'amplitude

Amplitude α_n	Décr. log. λ	Amplitude α_n	Décr. log. λ
1°50'	0.00419	1°12'	0.00413
1°41'	0.00419	1° 7'	0.00412
1°33'	0.00419	1° 2'	0.00413
1°26'	0.00416	0°57'	0.00413
1°19'	0.00416	—	—

On sait qu'à la température ordinaire le décrément λ est effectivement à peu près indépendant de l'amplitude pour les petites amplitudes.

§ 5. *Influence de la température sur la durée d'oscillation (variation du second module d'élasticité).* — Il a été constaté pour les métaux ⁽¹⁾ et pour les verres ⁽²⁾ que la durée d'oscillation T diminue en général lorsque la température baisse. C'est le contraire que l'on observe pour les fils de quartz. D'après la formule (2) :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{E}},$$

une augmentation de la durée d'oscillation correspond à une diminution du second module d'élasticité. Le tableau VI montre quelle est la variation de T avec la température pour tous les fils de quartz de nos expériences; il en résulte que le module d'élasticité du quartz diminue lorsque la température baisse ⁽³⁾.

TABLEAU VI.

Variation de durée d'oscillations avec la température

TEM- PÉRATURE ϑ	Petit moment d'inertie $I_1 = 897 \text{ gr. cm}^2$				Gr. mom. d'inertie $I_2 = 3400 \text{ gr. cm}^2$	
	Fil III T	Fil IV T	Fil V T	Fil VI T	Fil IV T	Fil V T
de la salle	1.791	1.475	1.865	1.905	2.881	3.643
0°	1.793	1.477	1.866	1.907	2.885	3.645
— 79°	1.798	1.484	1.877	1.915	2.901	3.666
— 194°	1.811	1.500	1.897	1.930	2.921	3.689

La variation de la durée d'oscillation ne paraît pas suivre une loi linéaire; elle n'est pas la même pour tous les fils. Il

¹⁾ C.-E. Guye et H. Schapper, *loc. cit.*

²⁾ C.-E. Guye et S. Vassileff, *loc. cit.*

³⁾ C.-E. Guye et V. Fréedericksz ont observé une variation de même sens pour le second module d'élasticité du quartz.

semble même que l'augmentation de T est un peu plus grande lorsque les oscillations sont plus rapides (voir les fils IV et V). Il convient cependant de ne pas insister sur ce dernier point vu le peu de précision des expériences.

En comparant les durées des oscillations observées aux plus basses températures avec celles qu'on trouve à zéro, on obtient les rapports suivants :

$$\frac{T_{-79}}{T_0} = 1,003 \text{ à } 1,006 \quad \text{et} \quad \frac{T_{-194}}{T_0} = 1,010 \text{ à } 1,017.$$

(*A suivre.*)
