



HAL
open science

Effets des neutrons rapides sur quelques constantes physiques du quartz cristallin et de la silice vitreuse

Guy Mayer, Jean Gigon

► **To cite this version:**

Guy Mayer, Jean Gigon. Effets des neutrons rapides sur quelques constantes physiques du quartz cristallin et de la silice vitreuse. *Journal de Physique et le Radium*, 1957, 18 (2), pp.109-114. 10.1051/jphysrad:01957001802010900 . jpa-00235623

HAL Id: jpa-00235623

<https://hal.science/jpa-00235623>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EFFETS DES NEUTRONS RAPIDES SUR QUELQUES CONSTANTES PHYSIQUES DU QUARTZ CRISTALLIN ET DE LA SILICE VITREUSE

Par GUY MAYER et JEAN GIGON,

Commissariat à l'Énergie Atomique, Service de Chimie physique.

Nature des échantillons. — De nombreuses expériences nous ont montré que des lames de quartz d'orientation et de dimensions identiques coupées dans des cristaux naturels d'origines différentes (Brésil, Madagascar, Dauphiné) avaient des fréquences propres égales à 10^{-3} près en valeur relative. Les traitements thermiques n'ont pas d'action sensible sur ces fréquences. Il en va de même pour les coefficients de dilatation thermique. Mais pour la constante piézoélectrique que nous mesurons, les difficultés de la mesure et l'existence toujours possible de petites zones mâclées ne permettent pas de préciser sa valeur à mieux que 10^{-2} en valeur relative.

Nos échantillons de silice les plus irradiés à ce jour sont des cylindres de quartz fondu transparent de provenance française. Le tableau I groupe des résultats expérimentaux de nature à nous rassurer sur l'identité des propriétés élastiques du produit final, malgré la diversité des procédés de purification employés par les industriels.

TABLEAU I

PROVENANCE QUALITÉ	QUARTZ TRANSPARENT	ET SILICE OPAQUE	HERAUS	
—	—	—	HOMOSIL	ULTRASIL
$\sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot 10^{-5}$ c. g. s.	5,756	5,755	5,757	5,754

E EST LE MODULE D'YOUNG, ρ LA DENSITÉ.

Au cours de nos expériences d'irradiation, nous n'avons jamais réussi à prendre en flagrant délit de comportement différent deux échantillons de provenances différentes.

Méthodes d'irradiation. — Toutes les irradiations ont été faites dans la pile de Saclay. Ni le silicium, ni l'oxygène, ni les impuretés de nos échantillons ne donnèrent de radioactivités qui rendissent les échantillons dangereux à manipuler deux jours après sortie de la pile.

Comme nous le montrerons plus loin, les neutrons rapides qui circulent dans la pile sont, sinon les seuls responsables, du moins des agents indispensables pour produire les effets que nous étudions. Dans une gaine d'aluminium plongée directement dans l'eau lourde au centre de la cuve, le flux des

neutrons dont l'énergie est supérieure à 1 MeV (flux mesuré à l'aide de la réaction $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$) est de $2,5 \cdot 10^{11}$ neutrons $\cdot \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ quand la pile marche à 1 000 kW. Pour accélérer notre étude, nous avons irradié des échantillons dans un « convertisseur de neutrons », tube d'uranium maintenu par le circuit réfrigérant de la pile à une température inférieure à 55 °C. Le spectre des neutrons y est décalé vers les grandes énergies et, la pile marchant à 1 000 kW, le flux de neutrons rapides mesuré au soufre est voisin de 10^{12} neutrons $\cdot \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dans la suite, nous exprimons nos résultats en doses de neutrons ayant une énergie supérieure à 10 keV, ces flux étant calculés à partir des mesures d'activation du soufre à l'aide d'hypothèses sur les spectres énergétiques de neutrons. Il y a, dans cette façon de présenter les choses, l'affirmation implicite que les rayonnements gamma de la pile interviennent peu dans les effets observés. Deux séries d'expériences la justifient :

a) Les effets d'irradiation, à température égale, sur des échantillons placés en des points différents de la pile se sont toujours révélés proportionnels aux doses de neutrons rapides.

b) Nous n'avons jamais réussi à provoquer des modifications atteignant 10^{-3} en valeur relative d'aucune constante élastique d'échantillons irradiés ou non irradiés à l'aide de rayonnement γ ou X.

D'autres auteurs ont déjà publié des courbes où figuraient en abscisse des doses de neutrons rapides et en ordonnées des constantes physiques du quartz cristallin ou vitreux. Ce sont, à notre connaissance :

BERMAN [4] : Conductivité thermique.

WITTELS et SHERRIL [2] : Dimensions macroscopiques et paramètres de réseau.

JOHNSON et PEASE [3] : Fréquence d'une lame de quartz ; paramètres de réseau.

PRIMAK, FUCHS et DAY [4] : Densité, pouvoir rotatoire, propriétés optiques, etc...

J. H. CRAWFORD [5] : Paramètres de réseau, propriétés magnétiques et optiques.

J. LUKESH [6] : Spectres X de la silice fondue irradiée ou non.

Nous ne pouvons indiquer nos flux avec plus de précision que ces auteurs, ni tenter une meilleure évaluation du nombre d'atomes déplacés par le choc des neutrons rapides. Nous nous sommes attachés surtout à établir à chaque étape d'irra-

diation une corrélation précise entre les variations des différentes constantes mesurées. Voici à titre d'exemple les doses que différents auteurs jugent nécessaires pour allonger de 1 pour cent un échantillon de quartz perpendiculaire à l'axe optique (tableau II).

AUTEURS	PRIMAK [4]	JOHNSON [3]	MAYER ET GIGON
TEMPÉRATURE D'IRRADIATION	40 — 100 °C	95 °C	< 55 °C
Dose pour obtenir $\frac{\Delta l}{l} = + 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{18}$	$9,6 \cdot 10^{18}$	$3,6 \cdot 10^{18}$

A ce stade d'irradiation, différents auteurs sont à peu près d'accord sur l'ordre de grandeur de la fraction d'atomes déplacés : 10^{-4} .

Méthodes de mesure. — A) DILATATIONS. — Les modifications de longueur dues à l'irradiation ont été mesurées au Palmer. Les mesures sont faites sur des échantillons de 3 cm environ à $\pm 10^{-3}$ cm. Les variations de longueur entre 0 °C et — 191 °C dont nous tirons des coefficients de dilatation sont mesurées à $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ cm avec un comparateur à aiguille.

B) CONSTANCE PIÉZOÉLECTRIQUE. — Malgré tous nos efforts de nettoyage, le disque de quartz destiné à la mesure de la constante piézoélectrique s'est montré trop conducteur après une dose de $22 \cdot 10^{18}$ neutrons. cm^{-2} pour être mesuré par une méthode électrométrique statique. Nous avons alors opéré ainsi :

A une extrémité d'un barreau de nickel long de un mètre et fixé en son milieu, on colle le disque qu'on veut mesurer ; à l'autre on colle un disque de mêmes dimensions qui sert d'étalon. Les deux quartz sont munis d'une métallisation qui sert d'électrode ; l'autre électrode est constituée par le barreau lui-même. On excite la vibration longitudinale fondamentale du barreau par magnétostriction, et on compare les tensions produites par le débit des charges piézoélectriques de chacun des quartz dans une résistance choisie assez faible ($\approx 10^5$ ohms) pour éliminer l'influence de la capacité des quartz.

c) CONSTANTES ÉLASTIQUES. — Les fréquences des modes longitudinaux de vibration sont déterminées par la méthode de résonance acoustique que nous avons décrite dans un précédent article [7] ; les mesures sont faites à 10^{-5} en valeur relative. Cette précision n'est pas superflue. En effet, dans le cas d'un corps isotrope comme la silice vitreuse, deux paramètres sont nécessaires pour caractériser les propriétés élastiques, par exemple le module d'Young E et le module de Poisson σ . La connaissance de la fréquence fondamentale longitudinale

f_1 d'un barreau cylindrique dont le rayon r n'est pas infiniment petit devant la longueur l ne suffit pas à déterminer exactement ni E ni σ . Il nous faut mesurer aussi la différence δ_{12} entre f_1 et la moitié de la fréquence f_2 de l'harmonique 2 ou bien la quantité analogue $\delta_{13} = f_1 - f_3/3$. Par exemple pour un cylindre de silice défini par $l = 3$ cm, $r = 0,5$ cm, $f_1 \approx 95\,900$ Hz, $\delta_{12} \approx 815$ Hz, $\delta_{13} \approx 3\,550$ Hz.

A partir de mesures de fréquences à 10^{-5} , on mesure δ_{12} à $2 \cdot 10^{-3}$ près. Physiquement, les valeurs non nulles des expressions δ_{12} , δ_{13} , etc... sont l'expression d'un couplage entre les modes de vibration purement longitudinaux et la fondamentale des fréquences radiales [8]. Le quotient $\Delta_{12} = \delta_{12}/f_1 = 1 - f_2/2f_1$ ne dépend que de r/l et de σ .

De ces grandeurs expérimentales, nous tirons E et σ à l'aide des tables calculées par Dennison-Bancroft [9] qui donnent la solution numérique des équations proposées par Love [10].

Pour la silice vitreuse, en prenant pour la densité la valeur $\rho = 2,205$ g. cm^{-3} , nous trouvons

$$E = 7,305 \cdot 10^{11} \text{ c. g. s. } \quad \text{et} \quad \sigma = 0,170.$$

En combinant, dans la formule $K = 3(1 - 2\sigma)/E$, E ainsi mesuré avec la valeur de la compressibilité K mesurée par Bridgman $K = 2,698 \cdot 10^{-12}$ c. g. s., on trouve $\sigma = 0,171$. La mesure des fréquences de vibration en torsion par une méthode classique [11] fournit une vérification de plus, car ces fréquences dépendent de $E/(1 + \sigma)$.

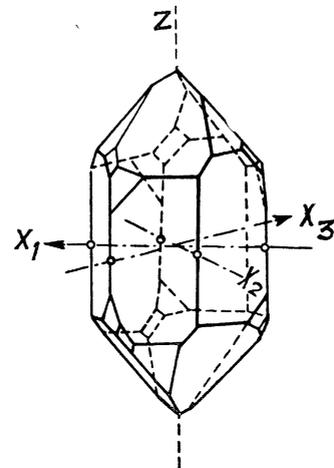


Fig. 1.

Le cas du quartz est plus compliqué puisque son anisotropie lui confère six constantes élastiques indépendantes. Par contre, ses deux constantes piézoélectriques permettent d'exciter et de détecter commodément beaucoup de modes de vibration. Le tableau III résume les propriétés élastiques du quartz en exprimant les déformations S_i en fonction des tensions T_i et des champs électriques E_x et E_y . La figure 1 précise le choix des axes : Oz axe

ternaire ou axe optique est affecté de l'indice 3. Pour axe Ox affecté de l'indice 1 on prend l'un quelconque des trois axes binaires x_1, x_2, x_3 . L'axe Oy affecté de l'indice 2 s'obtient alors en complétant un trièdre cartésien direct Oxyz. S_4, S_5 et S_6 sont des cisaillements ; par exemple S_6 est la déformation qui transforme en losange un carré situé dans xOy. Pour un cylindre taillé parallèlement à Oz, le module d'Young est $1/s_{33}$ dans cette direction et le module de Poisson correspondant est $-s_{13}/s_{33}$.

TABLEAU III

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{11} T_1 + s_{12} T_2 + s_{13} T_3 + s_{14} T_4 + d_{11} E_x \\ S_2 &= s_{12} T_1 + s_{11} T_2 + s_{13} T_3 - s_{14} T_4 - d_{11} E_x \\ S_3 &= s_{13} T_1 + s_{13} T_2 + s_{33} T_3 \\ S_4 &= s_{14} T_1 - s_{14} T_2 + s_{44} T_4 - d_{14} E_x \\ S_5 &= s_{44} T_5 + 2s_{14} T_6 - d_{14} E_y \\ S_6 &= 2s_{14} T_5 + 2(s_{11} - s_{12}) T_6 - 2d_{11} E_y \end{aligned}$$

On peut également caractériser les propriétés élastiques du quartz par des équations du type

$$T_i = \sum_j c_{ij} S_j$$

donnant cette fois les tensions en fonction des déformations. On peut calculer les c_{ij} à partir des s_{ij} et réciproquement.

Pour mesurer les constantes élastiques par des expériences de vibration, deux méthodes sont possibles :

A) Faire vibrer des échantillons de forme allongée (dimensions radiales faibles devant la longueur l), l'ébranlement se propageant dans la direction de l ou formant des ondes stationnaires entre les faces perpendiculaires à l . On peut alors considérer que toutes les tensions non orientées vers l sont nulles et on définit ainsi, à l'aide de l , de la fréquence fondamentale f_1 et de la densité ρ une constante élastique du type s_{11} :

$$s_{11} = 1/4 \rho l^2 f^2$$

s_{11} s'exprimant en fonction des s_{ij} définis par le tableau III et des cosinus directeurs de la direction l .

B) Faire vibrer des échantillons en forme de lames d'épaisseur e faible devant les dimensions radiales, l'onde stationnant entre les faces perpendiculaires à e . On peut alors considérer que toutes les déformations autres que celle qui se propage dans la direction e sont nulles et on définit ainsi une constante du type c_{11} :

$$c_{11} = 4 \rho e^2 f^2$$

Bien que beaucoup d'auteurs aient certainement mesuré leurs longueurs et leurs fréquences à mieux que 10^{-4} , il subsiste entre leurs résultats des différences relatives plus importantes (tableaux IV et V).

TABLEAU IV

	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{44}	c_{33}	
D'après ATANASOFF et HART [12]...	87,55	6,07	13,3	17,25	57,19	106,8	$\times 10^{+10}$ c. g. s.
D'après MASON [13]	86,05	4,85	10,45	18,25	58,65	107,1	$\times 10^{+10}$ c. g. s.

TABLEAU V

	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{44}	s_{33}	
VOIGT (1890), Mesures statiques	129,5	-16,9	-15,3	-43,1	200,4	98,8	$\times 10^{-14}$ c. g. s.
MASON (1950)	127,9	-15,35	-11,0	-44,6	197,8	95,6	$\times 10^{-14}$ c. g. s.
MAYER et GIGON (1956)	126,8	-16,2	-13,2	-44,7	200,7	97,3	$\times 10^{-14}$ c. g. s.

Notre préférence d'expérimentateurs va aux barreaux allongés qui rendent aisées les mesures de longueur et de dilatation thermique, plutôt qu'aux lames minces qui sont fragiles et dont la fabrication est plus délicate. De plus la comparaison des premiers harmoniques des barreaux est instructive car la fondamentale radiale est franchement plus élevée et le couplage théoriquement calculable. On arrive ainsi à mesurer plusieurs constantes sur un même barreau. Dans une lame au contraire, la fondamentale intéressante risque d'être couplée avec une des harmoniques radiales qui l'encadrent.

Choix de la coupe des échantillons. — Notre valeur s_{11} provient d'une moyenne de valeurs obtenues sur différents barreaux Ox ou Oy.

s_{33} et s_{13}/s_{33} sont obtenues sur des cylindres Oz

par une méthode analogue à celle que nous avons expliquée pour la silice vitreuse ; par mesure des fréquences de torsion, les cylindres Oz donnent s_{44} . Ces quatre coefficients interviennent dans le module s_{11} d'un barreau orienté suivant la bissectrice de xOz. La mesure de sa fréquence longitudinale vérifie les valeurs déjà trouvées :

$$s_{11} = (1/4) (s_{11} + 2s_{13} + s_{44} + s_{33}).$$

Appelons η cette direction. Une moyenne sur huit barreaux nous donne $s_{\eta} = 99,52.10^{-14}$.

L'expression $(1/4) (s_{11} + 2s_{13} + s_{44} + s_{33})$ avec les valeurs trouvées sur les cylindres Ox et Oz vaut $s = 99,60.10^{-14}$.

(Cette quantité vaut $99,52.10^{-14}$ d'après Voigt et $99,80.10^{-14}$ d'après Mason.)

D'autre part les fréquences des barreaux d'axe

situé dans yOz et faisant des angles de $\pm 45^\circ$ et -45° avec Oz sont respectivement déterminés par

$$s_g^+ = (1/4) (s_{11} + 2s_{13} + s_{44} + s_{33}) + s_{14}/2$$

et

$$s_g^- = (1/4) (s_{11} + 2s_{13} + s_{44} + s_{33}) - s_{14}/2.$$

On atteint ainsi avec les valeurs expérimentales :

$$s_g^- = 121,90 \cdot 10^{-14} \text{ et } s_g^+ = 77,23 \cdot 10^{-14}$$

la valeur $s_{14} = -44,67 \cdot 10^{-14}$.

Pour s_{12} nous devons nous contenter d'une méthode indirecte. Une lame mince dont l'épaisseur est parallèle à Oy vibre en cisaillement d'épaisseur

quand on l'excite par un champ Ey , ce qui donne

$$c_{66} = 40,6 \cdot 10^{10} \text{ c. g. s.}$$

$$\text{Or } s_{66} = 2(s_{11} - s_{12}) = (1/c_{66}) + (4s_{14}^2/s_{44})$$

On en tire $s_{12} = -16,2 \cdot 10^{-14}$ c. g. s.

Nous ne pouvons vérifier ce résultat.

Effets d'irradiation. — Quelles que soient les valeurs absolues exactes des constantes élastiques, nous pouvons connaître avec une bonne précision leurs variations relatives en suivant l'évolution des fréquences propres de la série d'échantillons que nous avons définie. La tableau VI résume nos résultats relatifs au quartz. Le tableau VII résume nos résultats pour la silice vitreuse ; dans ce tableau

TABLEAU VI
(QUARTZ CRISTALLIN)

	s_{11}	s_{13}	s_{33}	s_{44}	s_{14}	s_{12}
Avant irradiation	126,8	-13,2	97,3	200,7	-44,7	-16,2
Après $22 \cdot 10^{18}$ neutrons .cm ⁻² . . .	123,52	-15,38	102,56	211,33	-40,7	-14,9
Variation relative en pour cent . . .	- 2,58	+ 16,5	+ 5,41	+ 5,3	- 9	- 8
	$s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$		lx	lz	d_{11}	
Avant irradiation	286		30,027	30,030	$6,7 \cdot 10^{-8}$ u. é. s.	
Après $22 \cdot 10^{18}$ neutrons .cm ⁻² . . .	276,8		30,198	30,075	$5,5 \cdot 10^{-8}$	
Variation relative en pour cent . . .	- 3,2		+ 0,57	+ 0,15	- 17	

Les constantes élastiques doivent être multipliées par 10^{-14} pour être en c. g. s. ; les longueurs sont en mm ; la constante piézoélectrique d_{11} est en c. g. s.-u. é. s. Toutes ces mesures sont faites à 20 °C.

TABLEAU VII
(SILICE VITREUSE)

	s_{11}	s_{1j}	$s_{tt} = 2(s_{11} - s_{1j})$	1 mm
Avant irradiation	136,90	-23,27	320,34	44,975
Après $7 \cdot 10^{18}$ neutrons .cm ⁻² . . .	134,96	-24,16	318,2	44,835
Variation relative en pour cent . . .	- 1,42	+ 3,8	- 0,66	- 0,31

les constantes s_{ij} , s_{ij} , s_{tt} , introduites pour faciliter la comparaison avec le quartz, sont reliées aux modules d'Young et de Poisson par les relations :

$$s_{11} = 1/E \quad - s_{1j}/s_{11} = \sigma \quad s_{tt} = (2/E) (1 + \sigma).$$

La figure 2 montre les variations relatives de deux constantes en fonction de l'allongement relatif dans la direction Ox.

La figure 3 montre l'allongement suivant Ox en fonction du flux.

Dans la figure 2 la précision des mesures qui fournissent abscisses et ordonnées des points nous permet d'affirmer que les courbes ne sont pas des droites. La concavité d'abord dirigée vers le bas change de signe par la suite. Ceci est particulièrement net pour s_{11} .

Dans la figure 3 les abscisses ne sont pas assez bien définies pour que la concavité dirigée vers le haut que suggère la position des points soit certaine.

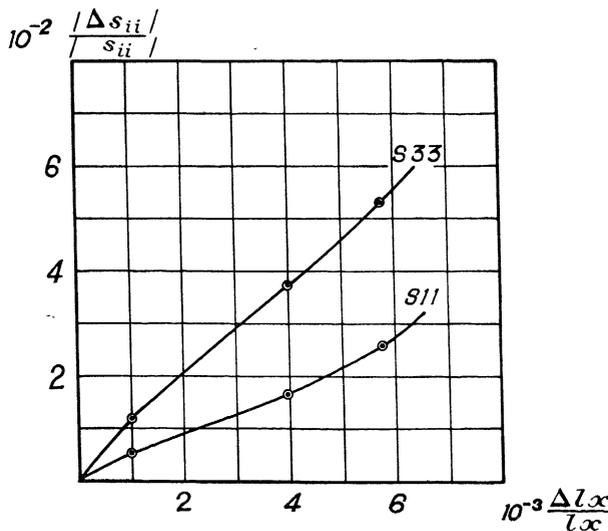


FIG. 2.

D'après le travail de Wittels et Sherrill [2], cette concavité existe et est destinée à s'accroître aux grands flux.

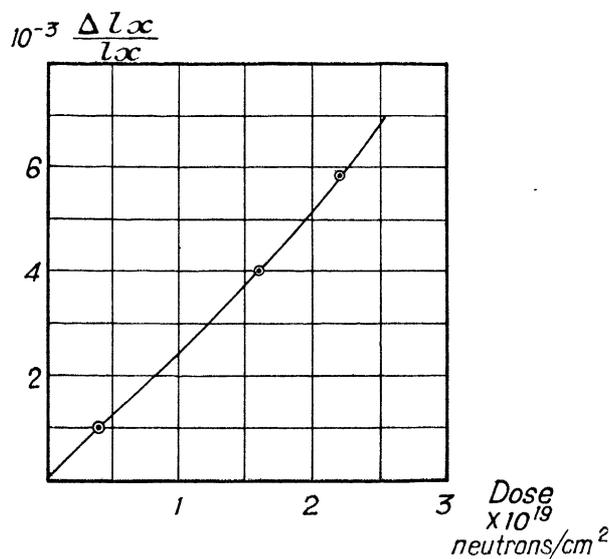


FIG. 3.

Discussion de la mesure de $s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$. — La lame qui nous a fourni c_{66} , donc s_{66} et s_{12} , n'avait reçu que $4 \cdot 10^{18}$ neutrons. cm^{-2} ; c'est par le procédé peu sûr d'une extrapolation linéaire que nous avons trouvé la valeur de s_{12} qui figure au tableau VI à la ligne du produit irradié à $22 \cdot 10^{18}$ neutrons. cm^{-2} . Nous avons pourtant trois raisons de croire assez exacte cette valeur, donc aussi celle de s_{66} :

1. — Pour comparer nos estimations de flux à celles de Johnson et Pease [3], nous avons irradié comme eaux une lame de coupe « BT » dont la fréquence est déterminée par une quantité c qui s'exprime ainsi :

$$c = \frac{0,43s_{14} + 0,57s_{66} + 1,98s_{11}}{s_{14}s_{66} - 4s_{11}^2}$$

D'après nos mesures de s_{14} et s_{44} , nous devons avoir après irradiations à $22 \cdot 10^{18}$ neutrons. cm^{-2} :

$$\Delta c/c = (-0,24\Delta s_{66} - 10,48) 10^{-2}$$

Or expérimentalement $\Delta c/c = -8 \cdot 10^{-2}$ ce qui mène à $\Delta s_{66} \approx -10$. (Nous trouvons $\Delta s_{66} = -9,2$.)

2. — La fréquence de vibration en torsion du cylindre Ox irradié ne change pas sensiblement. Or cette fréquence dépend principalement de la quantité $s_{66} + s_{44}$. (Nous n'avons pas su expliciter les termes correctifs.) Donc $\Delta s_{66} \approx -\Delta s_{44}$.

(Nous trouvons $\Delta s_{66} = -9,2$ et $\Delta s_{44} = +10,63$.)

3. — La quantité $\Delta_{12} = 1 - f_2/2f_1$ où f_1 et f_2 sont les deux premières fréquences longitudinales

est, dans le cas du cylindre Ox, une fonction croissante que nous n'avons pas su expliciter des quantités $|s_{12}|$, $|s_{14}|$, $|s_{13}|$. Or Δ_{12} diminue par irradiation, ce qui confirme que $|s_{12}|$ ne croît pas.

Signification des résultats. — D'après le travail de Lukesh [6], pour des irradiations environ dix fois plus importantes que notre dose de $2,2 \cdot 10^{19}$ neutrons. cm^{-2} , silice vitreuse et quartz cristallin aboutissent à un même état final probablement isotrope car les rayons X mettent en évidence sa structure vitreuse.

Nous devons donc nous attendre à voir disparaître petit à petit du tableau des constantes élastiques celles qui sont liées à l'anisotropie : s_{14} et les deux constantes piézoélectriques. De même, le pouvoir rotatoire tend vers zéro (4). s_{11} doit aller à la rencontre de s_{33} et s_{44} de la silice doit les rejoindre, s_{44} doit aller à la rencontre de s_{66} et s_{tt} doit les rejoindre, etc...

L'examen de nos résultats montre deux exceptions à cette règle : s_{66} s'enfuit trop vite devant le s_{tt} de la silice ; s_{12} tourne le dos à s_{13} donc aussi à s_{ij} de la silice. Ces deux exceptions sont dues au comportement de s_{12} et c'est pourquoi nous avons tant insisté sur les moyens de surveiller son évolution. Dans le quartz non irradié, cette constante dépend plus qu'aucune autre de la température : de 1,3 pour mille à 2 pour mille par degré suivant les auteurs [12, 13]. Mais si l'on s'intéresse aux fréquences propres et non plus aux constantes élastiques qu'on peut en tirer à l'aide des hypothèses de la théorie classique, la tendance à l'isotropie du quartz et la tendance à l'identité du quartz et de la silice ne souffrent plus d'exception comme le schématise le tableau VIII où les flèches symbolisent le sens de la variation par irradiation. Dans une même ligne une double flèche indique une variation absolue plus grande qu'une flèche simple. $f_i(1)$ et $f_i(2)$ sont les deux premières fréquences longitudinales. Les f_t sont les fréquences en torsion. Les valeurs indiquées sont relatives à des cylindres non irradiés de 3 cm de longueur et 1 cm de diamètre.

TABLEAU VIII

	SILICE VITREUSE	CYLINDRE OX	CYLINDRE OZ
$f_i(1)$	95 900 ↗	90 700 ↗ ↗	104 000 ↘ ↘
$1 - \frac{f_i(2)}{2f_i(1)}$	815 10^{-5} ↗	1 300 ↘	560 ↗ ↗
f_t	62 700 ↗	65 400 =	72 300 ↘

Pour en finir avec l'élasticité signalons que le frottement interne relatif à tous les modes de vibration étudiés augmente par irradiation (4).

(4) Pour une vibration longitudinale dans la direction oy, la largeur d'une bande de résonance située au voisinage de la fréquence de 10^5 cycles \times sec^{-1} est d'environ 2 cycles \times sec^{-1} à 20 °C avant irradiation. Après irradiation à $10 \cdot 10^{19}$ neutrons rapides, elle est large d'environ 100 cycles sec^{-1} .

Coefficients de dilatation thermique. --- Le tableau IX résume nos connaissances et nos expériences. De par sa construction, notre dilatomètre nous donne la différence entre l'allongement du corps étudié et celui d'un échantillon de silice vitreuse de même longueur. Les valeurs relatives à la silice vitreuse non irradiée sont empruntés aux tables de Landolt-Bornstein. Notons que les axes Ox et Oy du quartz suivant lesquels la dilatation thermique est la plus grande sont aussi ceux

de plus grands allongements sous radiation ; la silice vitreuse qui se contracte par irradiation a une dilatation thermique négative au-dessous d'une température voisine de -100 °C. Les modifications observées après irradiation sont du même ordre que l'erreur de mesure, mais nous avons répété les expériences dix fois pour réduire statistiquement cette erreur. Les résultats sont rapportés à une longueur de 3 cm.

La tendance à l'isotropie ne se manifeste guère.

TABLEAU IX

	SILICE VITREUSE	QUARTZ OX	QUARTZ OZ
Coefficients de dilatation linéaire à 20 °C	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$14,2 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$
Allongements entre -190° et 0° C	$-1,14 \mu$	$+56,3 \mu$	$+25,2 \mu$
Après irradiation de $7 \cdot 10^{18}$ neutrons.cm $^{-2}$	$(-1,14 - 0,3) \mu$		
Après irradiation de $22 \cdot 10^{18}$ neutrons.cm $^{-2}$		$+56,0 \mu$	$+25,1 \mu$

Le résultat relatif à la silice, d'ailleurs très incertain pourrait s'expliquer par un déplacement vers les hautes températures du point où le coefficient de dilatation change de signe. Nous opérons vers les basses températures pour éviter la guérison thermique des échantillons irradiés.

Guérison thermique. --- Nos échantillons irradiés nous paraissent en général trop précieux pour que nous les chauffions, mais nous avons fait de l'analyse thermique différentielle sur de la poudre de quartz irradiée à $5 \cdot 10^{18}$ neutrons.cm $^{-2}$ ($\rho = 2,640$ g cm $^{-3}$). Primak [4] a signalé que du quartz irradié à $49 \cdot 10^{18}$ neutrons.cm $^{-2}$ étudié par cette méthode⁽¹⁾ ne montrait plus trace de la transformation endothermique $\alpha \rightarrow \beta$ du quartz au voisinage de 573 °C. Des chauffages répétés à 900 °C ne la faisaient pas réapparaître.

A la dose de $5 \cdot 10^{18}$ neutrons.cm $^{-2}$, la transformation se manifeste encore ; la chaleur de trans-

formation (3 calories gm $^{-1}$ pour du quartz non irradié) a diminué d'environ 15 pour cent et, fait moins attendu, le point de transition s'est déplacé vers les basses températures d'environ 6 °C. Au retour de ce premier chauffage à 620 °C environ la transition $\beta \rightarrow \alpha$ se manifeste presque de la même façon que pour du quartz non irradié. Un second cycle montre une transition normale et la densité est alors $2,647$ g.cm $^{-3}$; sa valeur d'avant irradiation était $2,650$ g.cm $^{-3}$.

Conclusion. --- Nous nous proposons dans les mois qui viennent d'étirer nos courbes vers les grands flux pour tirer de l'imprécision les variations de certaines constantes, d'ajouter à notre collection de constantes étudiées le pouvoir diffusant en lumière ultra-violette du quartz qui augmente de plusieurs ordres de grandeur à la dose que nous avons atteinte et d'étudier l'action de la température pendant et après irradiation sur les effets observés. C'est alors seulement que nous entreprendrons de donner une justification théorique à tous ces chiffres.

Manuscrit reçu le 26 octobre 1956.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BERMAN (R.), *Proc. Roy. Soc.*, A 1951, **208**, 90.
 [2] WITTELS et SHERRILL, *Phys. Rev.*, 1954, **93**, 1117.
 [3] JOHNSON et PEASE, *Phil. Mag.*, 1954, **45**, 1, 651.
 [4] PRIMAK, FUCHS et DAY, *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1955, **38**, 135.
 [5] CRAWFORD (J. H.), Conférence de Genève, 1955, 753.
 [6] LUKESH (J. S.), *Phys. Rev.*, 1955, **97**, 345.
 [7] MAYER (G.) et GIGON (J.), *J. Physique Rad.*, 1955, **16**, 704.
 [8] GIEBE et BLECHSCHMIDT, *Ann. Physik*, 1933, **18**, 417.
 [9] DENNISON-BANCROFT, *Phys. Rev.*, 1941, **59**, 588.
 [10] LOVE (A. E. H.), A treatise on the mathematical theory of Elasticity, 4^e édition, Cambridge, 1952, 289.
 [11] BALAMUTH, *Phys. Rev.*, 1934, **45**, 715.
 [12] ATANASOFF et HART, *Phys. Rev.*, 1941, **59**, 85.
 [13] MASON (W. P.), Piezoelectric crystals, Van Nostrand, New-York, 1950, p. 84.