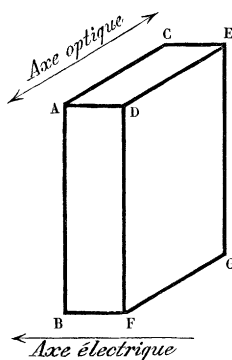


**DILATATION ÉLECTRIQUE DU QUARTZ;**

PAR MM. J. ET P. CURIE.

La première Partie de ce travail se rapporte à des expériences déjà anciennes (1881) <sup>(1)</sup>. Au moment où elles ont été entreprises, M. Lippmann <sup>(2)</sup>, dans un travail sur les applications des principes fondamentaux de la conservation de l'énergie, de la conservation de l'électricité et du principe de Carnot, montrait, en particulier, qu'avec la connaissance des phénomènes de piézo-électricité que nous avons découverts, on pouvait théoriquement prévoir la dilatation électrique de ce cristal, ainsi que la grandeur, le sens et la nature du phénomène.

Fig. 1.



Nos expériences entreprises à ce moment en ont donné la consécration expérimentale. A côté de l'intérêt particulier qu'elles peuvent avoir, elles se sont ainsi trouvées avoir l'intérêt plus général de vérifier les conséquences d'une théorie qui s'applique à un grand nombre de phénomènes.

Nous donnerons d'abord une vue d'ensemble de la nature des phénomènes.

Considérons un parallélépipède rectangle de quartz (*fig. 1*)

<sup>(1)</sup> *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XCH, p. 1137, et t. XCV.

<sup>(2)</sup> *Journal de Physique*, p. 387; 1881. — *Ann. de Chim. et de Phys.*, 1881. *J. de Phys.*, 2<sup>e</sup> série, t. VIII. (Avril 1889.)

ayant quatre arêtes, telles que AD, parallèles à l'un des axes électriques, et quatre arêtes, telles que AB, parallèles à l'axe optique.

*Premier cas.* — Si l'on comprime le cristal normalement aux faces ABC, DEFG, c'est-à-dire si l'on exerce l'effort dans le sens de l'axe électrique, on obtient un dégagement d'électricité sur les mêmes faces donné par la formule

$$q = Kf,$$

$q$  étant le dégagement électrique,  $f$  la force et  $K$  la constante piézo-électrique.

Nous avons trouvé qu'une force de  $1^{\text{ks}}$  dégage, par effort direct dans ces conditions, une quantité d'électricité capable de porter une sphère de  $16^{\text{cm}}$ , 6 au potentiel d'un daniell, d'où l'on déduit, pour la constante piézo-électrique en unités absolues C.G.S. électrostatiques,

$$K = 6,32 \times 10^{-8}.$$

$K$  est la quantité absolue d'électricité dégagée par un effort d'une dyne sur le quartz.

A ce dégagement piézo-électrique correspond un phénomène de dilatation électrique  $\delta$  dans le sens de l'axe électrique lorsque l'on établit une différence de potentiel  $V$  entre les deux faces qui lui sont normales (faces que l'on peut supposer argentées); on aura

$$\delta = K\varphi = 6,32 \times 10^{-8} V.$$

$\delta$  est ici exprimé en centimètres.

On voit que la grandeur de la dilatation dans le sens de l'axe électrique est indépendante des dimensions du cristal.

Cette grandeur est du reste extrêmement petite pour les tensions dont nous disposons; pour  $V = 14,8$ , soit 4400 volts environ, tension correspondant à  $1^{\text{mm}}$  d'étincelle dans l'air, on a

$$\delta = 0,935 \times 10^{-6},$$

soit  $0^{\text{u}},00935$  en microns,  $\frac{1}{100}$  de micron environ.

*Deuxième cas.* — Si l'on comprime le cristal dans la direction de l'axe optique, c'est-à-dire normalement aux faces ADBF', CFG, aucun dégagement électrique ne prend naissance.

Réciproquement, lorsque l'on établit une tension électrique quelconque, la longueur de l'axe optique ne varie pas.

*Troisième cas.* — Si l'on comprime le cristal dans une direction normale aux axes optiques et électriques, c'est-à-dire normalement aux faces ADEC, BFG, un dégagement électrique se produit sur les faces ABC, DFGE normales à l'axe électrique. Le dégagement électrique est de signe contraire de celui qu'aurait donné une compression dans le sens de l'axe électrique; il est donné par la formule

$$q = -K \frac{L}{e} f,$$

dans laquelle K est la même constante que précédemment

$$K = 6,32 \times 10^{-8},$$

L est la longueur AB du parallélépipède dans la direction normale aux axes optiques et électriques.

e est la longueur de la dimension AD parallèle à l'axe électrique dans le parallélépipède.

Réciproquement, lorsque l'on établit une différence de potentiel entre les deux faces ABC, DFG, normales à l'axe électrique, le cristal tend à se dilater ou à se contracter dans la direction normale aux axes optiques et électriques. Les effets sont donnés par la formule

$$\delta = -K \frac{L}{e} V = -6,32 \times 10^{-8} \frac{L}{e} V,$$

$\delta$  étant exprimé en centimètres et V en unités électrostatiques.

Ici le phénomène dépend de deux des dimensions du cristal et peut être considérablement amplifié en prenant une lame très mince dans le sens de l'axe électrique et très longue dans le sens normal aux axes optiques et électriques.

En résumé, lorsque l'on établit une différence de potentiel entre deux faces normales à l'axe électrique du parallélépipède de quartz, le parallélépipède se déforme; l'axe optique conserve toujours une longueur invariable, mais les autres dimensions changent. Pour un certain sens de la tension, l'axe électrique se contracte et la direction normale aux axes optiques et électriques

se dilate. Pour une tension de sens inverse, l'axe électrique se dilate et l'autre direction se contracte.

Les phénomènes piézo-électrique et de dilatation électrique sont liés entre eux par une loi de réaction analogue à la loi de Lenz. Le sens du phénomène de dilatation est par conséquent en relation avec la forme cristalline du quartz. Le quartz se contracte suivant l'axe électrique lorsque la charge positive se trouve à l'extrémité de cet axe qui correspond à une arête du prisme hexagonal portant les facettes du ditrièdre.

Cette extrémité se charge au contraire d'électricité négative lorsque l'on comprime le cristal dans le sens de l'axe <sup>(1)</sup>.

*Recherches avec une presse et un manomètre piézo-électrique.*

— Nous avons d'abord cherché à mettre en évidence les phénomènes de dilatation dans la direction de l'axe électrique. Ces phénomènes sont extrêmement faibles, d'après ce que nous avons vu plus haut; on a, pour la dilatation  $\delta$  exprimée en centimètres,

$$\delta = 6,32 \times 10^{-8} V;$$

pour  $V = 1$ , soit 300 volts environ, on a, pour  $\delta$  en microns,

$$\delta = 0^{\mu},000632;$$

pour une différence de potentiel correspondant à une étincelle de 1<sup>mm</sup>,  $V = 14,8$ , soit 4400 volts environ et l'on a, pour valeur correspondante de  $\delta$  en microns,

$$\delta = 0^{\mu},00935,$$

c'est-à-dire environ  $\frac{1}{100}$  de micron ou  $\frac{1}{50}$  de longueur d'onde.

De pareilles dilatations seraient à peine visibles par la méthode des anneaux colorés et l'existence du phénomène eût été extrêmement difficile à mettre hors de doute par ce procédé. Nous avons employé une autre méthode qui peut être généralisée et

(<sup>1</sup>) Nous avons par une erreur de rédaction donné le sens inverse de celui-ci vis-à-vis des facettes du cristal dans le *Journal de Physique*, p. 245; 1882. Cette erreur ne se rencontre pas dans les publications antérieures faites par nous (*Bulletin de la Société Minéralogique*, 1880, et *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XCI, p. 294).

qui donne une sensibilité extrême à toute constatation de dilatation dans un corps solide. Elle repose sur la remarque suivante : Supposons qu'un corps solide, un prisme de verre par exemple, ayant 1<sup>cm</sup> de base, éprouve sous l'action d'un agent physique quelconque, une variation égale à un millionième dans sa longueur, cette quantité sera difficilement constatable par un procédé direct. Mais, si l'on s'oppose d'une manière absolue à ce que cette variation de longueur se produise en maintenant les extrémités du prisme entre deux pièces invariables, l'action de l'agent physique sera d'accroître considérablement la pression : cet accroissement atteindra en effet 1<sup>kg</sup> dans l'exemple que nous avons choisi.

Un manomètre sensible, permettant dans ces conditions de mesurer les variations de pression, sera aussi extrêmement sensible à l'action de l'agent physique en question.

Comme manomètre nous employons un quartz piézo-électrique relié au point de vue électrique avec un électromètre à quadrant. Voici comment ces expériences ont été disposées :

L'appareil est une presse formée de deux plaques massives en bronze unies par trois grosses colonnes qui font corps avec l'une des plaques, traversent l'autre et sont terminées par des vis munies d'écrous. A l'aide des écrous, on serre entre les deux plaques une pile d'objets placés les uns au-dessus des autres. Ces objets sont partagés en deux systèmes distincts presque identiques entre eux (voir *fig. 2* théorique).

Le système inférieur sert uniquement à mesurer les variations de pression ; il se compose de trois lames de quartz ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) séparées par deux feuilles métalliques que l'on met en communication avec les quadrants d'un électromètre  $e$  qui accuse l'électricité dégagée par les variations de pression subies par les lames de quartz.

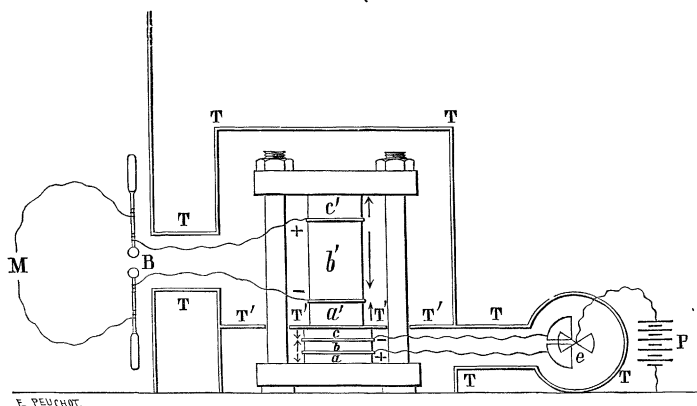
Ces trois lames sont taillées perpendiculairement à l'axe électrique ; mais la lame du milieu a été retournée et son axe est en sens inverse de celui des deux autres.

Dans ces conditions, il est facile de se rendre compte que, lors d'une variation de pression, les trois plaques concourront à charger d'électricités de signes contraires les deux feuilles métalliques intermédiaires.

Sur la figure, les flèches donnent le sens des axes des trois plaques.

Le système supérieur ( $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ) est identique au précédent, seulement les deux plaques métalliques intermédiaires communiquent avec les deux pôles d'une machine de Holtz M. Les plaques de quartz sont aussi plus épaisses que celles du système inférieur, afin de pouvoir employer des potentiels assez élevés sans avoir d'étincelles.

Fig. 2.



Lorsque l'on élève l'une des plaques métalliques intermédiaires à un potentiel positif et l'autre à un potentiel négatif, les trois cristaux obéissant à la théorie dont nous avons parlé plus haut tendent à donner une contraction ou une dilatation du système supérieur. Ces déformations ne peuvent se produire librement lorsque la presse est serrée et il en résulte des variations de pression dans toute la colonne. Le système inférieur dégage alors de l'électricité, ce qui fait dévier l'électromètre.

Certaines précautions sont nécessaires pour mener à bien ces expériences ; il s'agit en effet de mesurer de très petites quantités d'électricité dégagées par le système inférieur en présence des tensions énormes d'une machine de Holtz, agissant sur le système supérieur ; le plus petit effet d'influence venant de la machine sur les pièces communiquant avec l'électromètre masquerait le phénomène que l'on veut étudier. Aussi les deux systèmes, celui qui sert à produire le phénomène et celui qui sert à le mesurer, sont-

ils séparés au point de vue électrique d'une façon parfaite. Ils sont chacun enfermés dans des enveloppes métalliques (T, T, T, ...) communiquant avec la terre.

Le système inférieur qui sert de manomètre est même situé complètement avec l'électromètre à l'intérieur d'une enceinte métallique. Le corps de la presse communique aussi métalliquement avec la terre.

Enfin une plaque de cuivre (T'T'T'T') reliée à la terre se trouve pincée par son centre entre les deux systèmes de plaques de quartz, qu'elle sépare complètement au point de vue électrique. Cette plaque, plus large que la presse, n'intervient pas dans les phénomènes élastiques, parce que les colonnes la traversent sans la toucher par de larges trous ménagés à cet effet. Le raccord métallique parfait entre les colonnes et les plaques se fait à l'aide de feuilles d'étain flexibles. On peut toujours s'assurer que ces précautions sont efficaces : il suffit pour cela de faire l'expérience à blanc sans que les écrous soient serrés. Dans ces conditions, les tensions électriques établies dans le système supérieur ne doivent influencer en rien le système inférieur.

L'ensemble de l'appareil doit être parfaitement desséché. Sur la figure, P représente la pile de charge qui donne la sensibilité à l'électromètre.

Voici maintenant la marche d'une expérience :

On commence par serrer très fortement la presse, après avoir empilé au centre les pièces dont nous venons de parler. Cette pression énorme une fois établie, il se produit un tassement des pièces qui diminue la pression, et ce n'est guère qu'au bout d'une heure que, ce tassement étant complètement terminé, l'image de l'électromètre peut rester fixe au zéro.

On peut alors charger les plaques métalliques du système de lame supérieur avec la machine de Holtz. Les deux pôles de la machine sont reliés aux armatures d'une batterie de bouteilles de Leyde pour que la différence de potentiel s'établisse lentement et régulièrement. On a entre les deux pôles un micromètre à boules (B) qui permet de déduire le potentiel, au moment de la décharge, de la connaissance de la distance explosive.

Lorsqu'on fait tourner la machine, la différence de potentiel s'établit lentement, l'électromètre dévie également progressivement

et l'on note la déviation au moment où l'étincelle part entre les deux boules du micromètre. L'étincelle partie, l'image revient brusquement vers le 0.

Le sens du phénomène est bien celui donné par la théorie, et les déviations de l'électromètre sont proportionnelles aux différences de potentiel de la batterie données par les distances explosives.

Voici un Tableau numérique vérifiant cette dernière conclusion :

Distances explosives en millimètres.	Déviations de l'électromètre $\Delta$ .	Différences de potentiel V.	$\frac{\Delta}{V}$ .
1.....	21,5	14,8	1,45
2.....	38,7	25,6	1,51
3.....	54	36,1	1,49
4.....	69,5	45,7	1,52
5.....	84	55,1	1,52
6.....	105	65,3	1,60

Les explosions étaient obtenues entre des boules de 6<sup>cm</sup> de diamètre et les nombres de la troisième colonne sont ceux donnés par M. Baille (<sup>1</sup>).

Mais la proportionnalité des déviations au potentiel est établie suivant nous d'une façon beaucoup plus rigoureuse par ce fait que l'on ne change pas la grandeur absolue de la déviation de l'électromètre en renversant les pôles de la machine de Holtz avec une même distance explosive. Il est en effet très probable que, s'il n'y avait pas proportionnalité, il y aurait en même temps une différence d'intensité dans les effets produits par les tensions électriques de sens inverses.

Nous n'avons malheureusement pu faire aucune mesure de la grandeur réelle des phénomènes, parce que les propriétés élastiques de l'appareil nous étaient absolument inconnues. En supposant que le quartz seul se comprime et que ce corps ait le même coefficient d'élasticité que le verre, on arrive par la théorie à des nombres qui sont de l'ordre de grandeur de ceux obtenus. Cette vérification est tout à fait grossière.

---

(<sup>1</sup>) BAILLE, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 1882.



Nous avons répété ces expériences avec succès en opérant avec des prismes de tourmaline dont les bases étaient taillées perpendiculairement à l'axe électrique.

La sensibilité de l'appareil est extrême; elle dépend évidemment de la surface de base des cristaux employés, qui doit être aussi grande que possible, et de la hauteur de la colonne de cristaux, qui doit être aussi faible que possible. Avec des cristaux de quartz ayant  $7^{\text{cm}}$  de surface de base et une colonne ayant une hauteur totale de  $0^{\text{m}},10$ , la sensibilité était telle que la différence de potentiel correspondant à une distance explosive de  $1^{\text{mm}}$  entre des boules de  $0^{\text{m}},06$  de diamètre donnait une déviation de  $0^{\text{m}},25$  de l'échelle. On pouvait apprécier dans ces conditions l'effet produit par une variation de potentiel 200 fois plus faible.

D'après la théorie, si les cristaux, au lieu de se trouver dans la presse, avaient été libres, ils se seraient seulement dilatés pour cette dernière variation de potentiel de  $\frac{1}{10000}$  de micron environ.

Comme nous l'avons dit plus haut, cet appareil nous semble pouvoir être utilisé dans d'autres applications. On pourrait, par exemple, étudier avec des dilatations ou des contractions que les corps éprouvent sous l'influence du magnétisme. Il suffirait de remplacer dans la presse le système supérieur de lames de quartz par le corps que l'on voudrait étudier et de conserver toujours comme manomètre les lames inférieures communiquant avec l'électromètre (1).

### *Mesures des dilatations électriques à l'aide d'un levier am-*

(1) Plusieurs personnes nous ont fait remarquer que l'on aurait pu remplacer le manomètre piézo-électrique qui nous a servi par un manomètre optique formé d'un parallélépipède de verre dont la biréfringence aurait varié sous l'influence de la pression. Cela est parfaitement exact, mais ce manomètre optique eût été incomparablement moins sensible que le manomètre piézo-électrique. En effet, d'après les travaux de Wertheim, la sensibilité du parallélépipède de verre ne dépend que de l'une des dimensions latérales, qui doit être aussi faible que possible; on n'eût pu prendre moins de  $2^{\text{cm}}$  pour cette dimension sans compromettre la stabilité de la colonne comprimée dans la presse.

Une différence de marche d'une longueur d'onde aurait été alors produite par une pression de  $320^{\text{kg}}$  et, en admettant que l'on puisse évaluer  $\frac{1}{100}$  de frange au compensateur de Babinet, on aurait eu un manomètre sensible à  $3^{\text{kg}}$  près.

Le manomètre piézo-électrique était environ 600 fois plus sensible et donnait des indications pour une pression de  $5^{\text{gr}}$ .

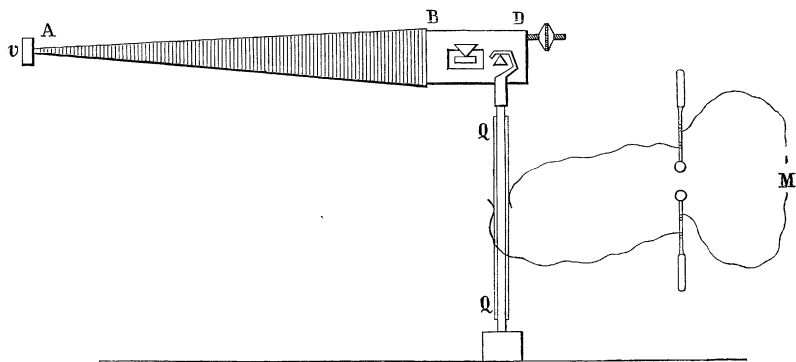
*plificateur et d'un microscope.* — Dans la direction normale aux axes optiques et électriques les dilatations doivent dépendre, comme nous l'avons vu plus haut, des dimensions du cristal. Elles sont données par la formule

$$\delta = K \frac{L}{e} V.$$

On voit qu'en prenant une lame longue et mince on peut espérer avoir des effets beaucoup plus sensibles que dans le cas de la dilatation dans le sens de l'axe électrique.

Pour la différence de potentiel correspondant à une distance explosive de 1<sup>mm</sup> dans l'air avec  $\frac{L}{e} = 100$ , on aurait pour la dilatation en microns  $\delta = 0,935$ , c'est-à-dire environ 1 micron ou deux longueurs d'onde. Il est certainement possible de mesurer de pareilles dilatations. L'appareil qui nous a servi se compose essentiellement d'un levier amplificateur et d'un microscope qui sert à mesurer les déplacements de l'extrémité du levier. La lame de quartz QQ (*fig. 3*), longue et mince, recouverte de deux feuilles

Fig. 3.



d'étain, était placée verticalement et maintenue fixe à la partie inférieure. L'axe électrique est horizontal et dirigé suivant l'épaisseur de la lame, et l'axe optique, également horizontal, est perpendiculaire au plan de la figure.

A la partie supérieure est fixée une pièce en cuivre terminée par un crochet.

Le levier amplificateur ABD est formé par une pièce en ébonite BD et par une longue aiguille AB, en carton très mince, munie d'un contrefort.

Dans la pièce d'ébonite sont enchâssés deux couteaux : le premier *c* repose sur un plan fixe, comme un couteau de balance ; le second, placé en sens inverse, s'appuie de bas en haut sur le crochet situé à l'extrémité de la lame de quartz.

A l'extrémité de l'aiguille est collée une lame de verre *v* sur laquelle on a fixé à la gomme une petite toile d'araignée. Le microscope, placé horizontalement, est braqué sur cette lame de verre et, quel que soit l'endroit mis au point, on trouve toujours dans la toile d'araignée des repères délicats.

Les déviations sont lues à l'aide d'un micromètre oculaire qui a été préalablement comparé avec un micromètre au  $\frac{1}{100}$  de millimètre placé sous l'objectif.

La distance des arêtes des deux couteaux est de 8<sup>mm</sup>. La longueur de l'aiguille a varié de 30<sup>cm</sup> à 60<sup>cm</sup>. Pour faire une mesure, on établit la communication des deux feuilles d'étain avec une machine de Holtz, une batterie et un micromètre à boule. On fait marcher la machine ; le potentiel et le déplacement de l'aiguille se font lentement et l'on note la déviation au micromètre au moment où part l'étincelle.

Les vérifications de la théorie se font bien quant au sens et à la proportionnalité des déplacements aux potentiels ; cependant cette dernière vérification est peu précise, étant donnée la petitesse de l'échelle dont on dispose avec un micromètre oculaire.

Quant aux vérifications numériques, une complication résulte des dispositions expérimentales qu'il est nécessaire de prendre pour pouvoir opérer aux potentiels élevés d'une machine de Holtz, sans que l'étincelle passe d'une face à l'autre des lames de quartz en contournant la surface. Les expériences ont porté sur trois lames différentes ; les deux premières furent recouvertes d'une mince couche d'arcanson, la troisième placée entre deux lames de mica et extrêmement mince, noyée dans le baume. De plus, l'étain des trois lames n'arrivait pas tout à fait jusqu'au bord.

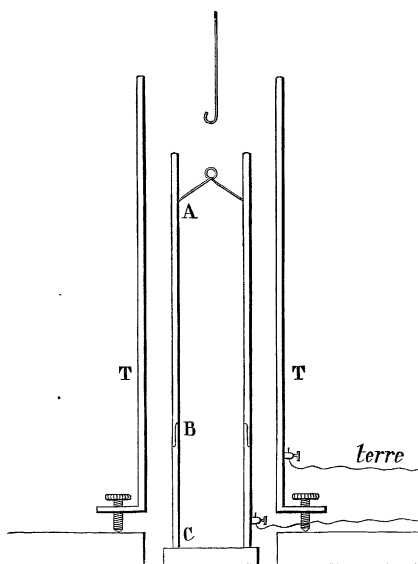
Dans ces conditions il n'est guère possible d'évaluer les pertes probables dans les effets produits et de calculer la dilatation d'après l'épaisseur de la lame, la longueur de l'étain utilisé et la valeur connue de la constante piézo-électrique.

Mais la théorie de M. Lippmann s'applique en particulier à chaque lame toute montée, et il suffit de déterminer la grandeur des phénomènes piézo-électriques de chaque lame, sans s'occuper des dimensions, pour pouvoir calculer les dilatations électriques correspondantes.

La grandeur des phénomènes piézo-électriques est déterminée en cherchant la traction nécessaire pour charger un condensateur de capacité connue au potentiel d'un daniell avec une des lames. Pour cela, la lame toute montée étant retournée le crochet en bas, on suspend directement à celui-ci les poids nécessaires pour obtenir le dégagement désiré.

Le condensateur absolu qui sert dans ces expériences est un condensateur cylindrique. Le cylindre intérieur ABC (*fig. 4*) se

Fig. 4.



compose de deux parties s'emboîtant en B l'une dans l'autre. On fait une première expérience avec les deux parties, puis une seconde en supprimant la portion supérieure, et la différence des deux mesures doit correspondre à une capacité que l'on peut calculer d'après les dimensions de la partie mobile, comme si elle faisait partie d'un cylindre indéfini.

L'erreur provenant de l'extrémité libre est la même dans les deux expériences et disparaît dans la différence.

Voici les dimensions de ce condensateur :

Longueur de la partie mobile.....	20,06 <sup>cm</sup>
Rayon extérieur du petit cylindre.....	6,603
Rayon intérieur du grand cylindre.....	8,070
D'où capacité calculée de la partie mobile....	$C = 49,99$ ( <sup>1</sup> )

Voici maintenant les résultats obtenus pour les trois lames de quartz :

	Lame.		
	I. <sup>cm</sup>	II.	III.
Longueur de l'étain utilisé approximativement....	2,8	4,0	4,0
Épaisseur.....	0,24	0,065	0,112
Traction nécessaire pour charger une capacité de 50 <sup>cm</sup> à la tension d'un daniell.....	258 <sup>gr</sup>	48,5	78,0
D'où une traction de 1 dyne dégageant une quantité absolue d'électricité égale à ( <sup>2</sup> ).....	$7,39 \times 10^{-7}$	$39,3 \times 10^{-7}$	$22,3 \times 10^{-7}$
D'où dilatation calculée pour l'unité de différence de potentiel.....	$7,39 \times 10^{-7}$	$39,3 \times 10^{-7}$	$22,3 \times 10^{-7}$
D'où dilatation calculée en millimètres pour une différence de potentiel égale à 14,8 ( <sup>3</sup> ), correspondant à une étincelle de 1 <sup>mm</sup> dans l'air entre boules de 6 <sup>cm</sup> de diamètre.....	»	0,00058	0,000330
<i>Idem</i> , pour une différence de potentiel de 65,2 (étincelle de 6 <sup>mm</sup> ).....	0,00048	»	»
Déplacement de l'extrémité du levier exprimée en divisions du micromètre oculaire pour tension de 1 <sup>mm</sup> étincelle.....	»	6,70	6,70
Déplacement pour tension de 6 <sup>mm</sup> .....	5,0	»	»
Une division du micromètre oculaire vaut en millimètres sans l'objectif.....	0,00413	0,00413	0,00361
Déplacement en millimètres de l'extrémité du levier....	0,0206	0,0276	0,0242
Rapports des bras de levier.....	40,8	46,5	77,3
D'où dilatation mesurée de la lame,.....	0,00050	0,00061	0,000313

(<sup>1</sup>) Ce même condensateur nous avait servi à déterminer la constante piézo-électrique du quartz. Dans des expériences récentes, faites avec un condensateur plan à anneau de garde, beaucoup plus parfait, nous avons eu la satisfaction de retrouver presque exactement le même nombre pour cette constante piézo-électrique.

(<sup>2</sup>) En prenant 0,00374 pour tension absolue de 1 daniell.

(<sup>3</sup>) D'après les mesures de M. Baille (*Ann. de Chim. et de Phys.*).

On a donc

	Lames.		
	I.	II.	III.
Dilatations mesurées.....	0,00050	0,00061	0,000313
Dilatations calculées.....	0,00048	0,00058	0,000330
Différences pour 100.....	$+\frac{1}{25}$	$+\frac{1}{25}$	$-\frac{1}{19}$

Ces résultats doivent être considérés comme satisfaisants ; les différences dépassent à peine les erreurs de lecture au micromètre oculaire.

Nous avons acquis la conviction, durant cette étude, que les phénomènes piézo-électriques et de dilatation électrique doivent être classés parmi les plus réguliers et que les mesures qui s'y rapportent pourraient utilement atteindre une précision très supérieure à celles dont nous disposions avec les appareils que nous venons de décrire.

*Expériences avec deux lames de quartz accolées, électromètre à bilame de quartz.* — Nous sommes parvenus à rendre beaucoup plus sensibles les effets produits par les dilatations électriques en usant d'un artifice analogue à celui qui sert de base au thermomètre métallique de Bréguet.

Les effets obtenus doivent encore ici être attribués aux forces élastiques qui entrent en jeu lorsqu'on s'oppose à la libre dilatation des lames.

Deux plaques de quartz sont taillées parallèlement dans un même bloc de quartz et normalement à un axe électrique ; leur contour a la forme d'un rectangle allongé.

La largeur des plaques (petit côté du rectangle) est parallèle à l'axe optique et la longueur est normale à la fois aux axes optiques et électriques. Les deux plaques identiques entre elles sont amincies ensemble au tour d'optique jusqu'à ce qu'elles soient réduites à l'état de lames n'ayant que quelques centièmes de millimètre d'épaisseur ; puis ces lames sont collées l'une sur l'autre au baume de Canada.

On a eusoin, avant de faire cette dernière opération, de retourner une des lames face pour face, si bien que les axes électriques (dirigés suivant l'épaisseur) sont de sens inverse dans les deux lames.

On obtient ainsi une bilame dont on argente les faces extérieures.

Si l'on établit maintenant une différence de potentiel entre les deux faces argentées, l'une des lames tend à s'allonger dans le sens de sa longueur, l'autre tend à se raccourcir. Comme elles sont collées l'une sur l'autre, la bilame se courbe et la convexité se trouve du côté de la lame qui s'allonge.

Pour observer ce phénomène, nous fixons une des extrémités de la bilame et nous regardons le déplacement de l'autre à l'aide d'un microscope. Le déplacement peut encore être amplifié en fixant à cette extrémité une aiguille longue et légère.

On peut aussi observer la flexion à l'aide d'un petit miroir collé au bout de la bilame.

Avec des lames minces et longues et une tension électrique suffisante, la flexion est visible à l'œil nu.

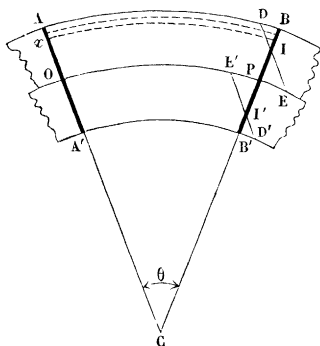
On peut encore réaliser une bilame susceptible de se courber sous les actions électriques en collant l'une contre l'autre les deux lames sans retourner l'une d'elles, mais en ayant soin d'argenter aussi les faces des lames en contact avant de les coller; on a ainsi une bilame présentant trois couches d'argent, une intérieure et deux extérieures. Ces deux dernières sont reliées entre elles et à la terre au point de vue électrique. On porte au contraire la surface argentée située entre les deux lames à un certain potentiel. Dans cette expérience les axes électriques sont de même sens dans les deux lames, mais les champs électriques auxquels elles sont soumises sont de sens inverses. L'effet est le même que précédemment : l'une des lames se dilate, l'autre se contracte et la bilame se courbe. Cette disposition est même préférable à la première; car, pour les mêmes lames et la même tension, on a deux fois plus de sensibilité.

Il est facile d'analyser ce qui se passe dans la bilame si l'on ne cherche qu'une première approximation. Désignons par  $L$  la longueur commune des deux lames de quartz. Si chacune d'elles était entièrement libre, il y aurait, lorsqu'on les place dans un champ électrique, un allongement  $\delta$  de la première et une contraction  $\delta$  de la seconde, si bien que les longueurs des deux lames différeraient entre elles de  $2\delta$ ; mais, comme les lames ne sont pas libres, il n'en est pas ainsi et la bilame se courbe dans l'action des forces élastiques.

La *fig. 5* représente une coupe longitudinale et normale aux faces d'une portion de la bilame  $AA'BB'$ .

Nous supposons que, lorsque les filets parallèles à la longueur de la bilame se courbent, les sections qui leur sont normales au

Fig. 5.



début leur restent toujours normales pendant la flexion (cette condition est nécessaire si la lame est très longue par rapport à l'épaisseur).

Soient

$AA'$  une section normale aux filets longitudinaux ;

$BB'$  une section normale infiniment voisine de la première ;

$l$  la distance comptée sur le filet médian entre les deux sections ;

$R$  le rayon de courbure de la bilame.

Si les filets longitudinaux compris entre  $OA$  et  $PB$  étaient soustraits aux forces élastiques longitudinales et libres de se contracter ou de se dilater en conservant leur courbure, et si à l'un des bouts les extrémités de ces filets étaient maintenues fixes dans le plan  $OA$ , les autres extrémités à l'autre bout viendraient toutes se placer dans un même plan  $DE$  parallèle à  $OA$ .

Les distances comptées le long de chaque filet entre  $BP$  et  $DE$  permettent de calculer pour chaque filet la grandeur de l'effort mécanique qu'il exerce pendant la flexion.

De même les filets compris entre  $OA'$  et  $PB'$  viendraient aboutir dans le plan  $E'D'$  parallèle à  $OA'$  s'ils étaient soustraits aux efforts mécaniques.



Soient I et I' les traces des intersections des plans DE, PB d'une part et D'E', B'P d'autre part.

Si les lignes I et I' sont dans l'intérieur des lames, les filets venant aboutir en I et I' n'exerceront aucun effort mécanique. Dans le cas contraire, tous les filets exerceront un certain effort longitudinal.

La portion située à gauche du plan AA' est en équilibre sous l'action des forces élastiques normales agissant à travers le plan AA'; donc :

1° La somme des forces élastiques normales au plan AB est nulle et l'on a  $\Sigma$  forces élastiques sur OA =  $\Sigma$  forces élastiques sur OA'.

Si les points I et I' sont à une même distance  $a$  de chaque côté de la surface OP de séparation des deux lames, il est manifeste (en supposant la flexion très faible et en négligeant les quantités du second ordre) que les filets de chacune des lames se correspondent deux à deux symétriquement et donnent des efforts égaux et de signes contraires.

Donc l'égalité ci-dessus est satisfaite dans ce cas et dans ce cas seulement.

On a donc

$$PI = PI' = a.$$

2° La somme des moments des forces élastiques s'exerçant sur AA' par rapport à un axe passant par O et normale au plan de la figure doit être nulle.

Soit  $x$  la distance variable Ox d'un filet  $dx$  à la surface médiane OP. Deux tranches d'épaisseur  $dx$ , situées à des distances  $+x$  et  $-x$  du plan médian OP, ont des moments égaux et de même signe. Il en résulte que la somme des moments des forces élastiques correspondant à chacune des deux lames doit être nulle séparément.

Désignons par  $e$  l'épaisseur d'une des lames, par  $l$  la longueur moyenne des filets, par  $\theta$  l'angle des deux plans AA' et BB', par E le coefficient d'élasticité du quartz dans la direction considérée, la dilatation due aux forces élastiques d'un filet par unité de longueur étant :

$$\frac{\theta(x - a)}{b}.$$

On a

$$\frac{E\theta}{l} \int_0^e x(a-x) dx = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{ae^2}{2} - \frac{e^3}{3} = 0,$$

soit

$$a = \frac{2}{3} e.$$

Ainsi les points I et I' sont situés dans l'intérieur des lames aux deux tiers de l'épaisseur de chacune d'elles à partir du plan de séparation.

Les tranches situées aux deux tiers de l'épaisseur de chaque lame ne sont soumises à aucune force élastique; elles ont donc leurs longueurs normales  $(L + \delta)$  et  $(L - \delta)$ ; sous l'action des champs électriques, on a

$$-\frac{R - \frac{2}{3}e}{R + \frac{2}{3}e} = \frac{L - \delta}{L + \delta} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{R} = \frac{3}{2} \frac{\delta}{eK}.$$

La courbure est la même partout; on voit qu'elle est indépendante de la grandeur du coefficient d'élasticité de la substance.

Supposons que nous soyons dans le cas d'une bilame à argente intérieure où la tension est au centre; on a

$$\delta = K \frac{L}{e} V,$$

V étant la différence de potentiel entre les deux faces de la bilame; on a donc

$$\frac{1}{R} = \frac{3}{2} \frac{KV}{e^2}.$$

La courbure totale  $\alpha$ , c'est-à-dire l'angle dont tournerait un miroir placé à l'extrémité de la lame, lorsqu'on établit la différence de potentiel, est donnée par

$$\alpha = \frac{3}{2} K \frac{L}{e^2} V,$$

et le déplacement latéral  $z$  de l'extrémité de la lame

$$z = \frac{3}{4} K \frac{L^2}{e^2} V.$$

Enfin, si l'on ajoute une aiguille de longueur  $\lambda$  à l'extrémité de

la lame, cette aiguille tournera autour d'un point fixe situé à la moitié de la longueur de la lame : on aura, pour le déplacement  $z$  de l'extrémité de l'aiguille,

$$z' = \frac{\lambda + \frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} \frac{3}{4} K \frac{L^2}{e^3} V,$$

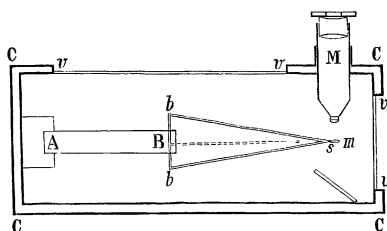
avec  $K = 6,32 \times 10^{-8}$ .

On voit qu'il est possible de prévoir d'avance la sensibilité d'un électromètre basé sur ce principe et qu'on pourra proportionner l'épaisseur de la lame à la sensibilité que l'on désire atteindre.

La formule qui précède ne donne qu'une première approximation. Elle est imparfaite au point de vue élastique et aussi au point de vue électrique. Nous avons négligé, par exemple, l'électricité répartie en volume dans l'intérieur des lames. Celles-ci étant en effet soumises à des déformations graduées, il en résulte une certaine densité en volume d'électricité dégagée à cause des propriétés piézo-électriques de la substance. Cette électricité doit réagir pour modifier légèrement l'intensité du champ et les formules précédentes ne doivent pas être absolument exactes.

Les *fig. 6* et *7* donnent une coupe verticale et une coupe horizontale de l'instrument que nous avons réalisé sur le principe que nous venons de décrire.

Fig. 6.



La bilame AB maintenue fixe en A est située dans une boîte (CCCC) portant deux vitres *vvvv*.

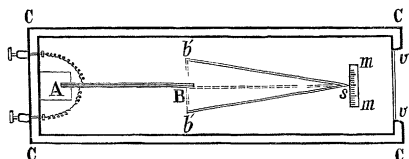
L'aiguille (*bbs, b'b's*) sert à amplifier le déplacement de l'extrémité de la bilame; elle est formée d'une charpente en fils de verre disposés suivant les arêtes d'une pyramide quadrangulaire; cette disposition la rend à la fois très légère et très rigide. L'aiguille collée en B à la bilame soutient à l'autre extrémité, en s, un micro-

mètre ( $mm$ ) au  $\frac{1}{30}$  de millimètre. Ce micromètre est obtenu par un procédé photographique, il possède des traits et des chiffres.

Le microscope fixe M, muni d'un réticule, permet de lire sur le micromètre les déviations.

L'instrument est toujours destiné à mesurer des potentiels élevés. La sensibilité, comme nous l'avons vu, dépend de l'épaisseur de la bilame. Nous avons mis à contribution le grand talent d'opticien de M. Werlein, qui est parvenu à construire des bilames ayant  $\frac{1}{15}$  de millimètre d'épaisseur (soit  $\frac{1}{30}$  de millimètre pour chaque lame) avec  $8^{\text{cm}}$  de longueur.

Fig. 7.



Pour rester dans des conditions pratiques, il faut se contenter de bilames ayant au moins  $\frac{1}{8}$  de millimètre d'épaisseur. On obtient alors des instruments sensibles à 5 volts près et pouvant servir jusque vers 1000 ou 1500 volts.

On réalise aussi avec des bilames ayant  $1^{\text{mm}}$  d'épaisseur des électromètres pouvant servir à mesurer, à 200 volts près, des tensions de 50 000 volts.

La première sensibilité est appropriée à la mesure des différences de potentiel des batteries de piles, des batteries d'accumulateurs, des machines dynamos à courants continus.

La deuxième sensibilité est appropriée à la mesure des potentiels élevés donnés par les machines électrostatiques.

Les lectures sont très rapides et l'isolement est très bon, grâce à une particularité des propriétés conductrices du quartz; l'un de nous a montré en effet que le quartz, qui présente une conductibilité très notable dans le sens de l'axe optique, ne conduit pas l'électricité dans le sens normal à l'axe.