

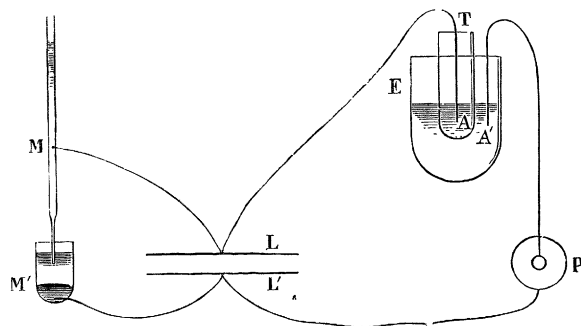
SUR LA RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DU VERRE AUX BASSES TEMPÉRATURES;

PAR M. G. FOUSSEREAU.

I. *Disposition des expériences.* — Quand on veut déterminer la résistance de substances très isolantes, comme le verre, la nécessité de maintenir les surfaces dans un état de siccité parfaite empêche, en général, d'opérer sur des échantillons d'une grande dimension. Il est donc indispensable d'employer une méthode très sensible. Dans l'état actuel de la Science, celles qui sont fondées sur l'usage du galvanomètre ne permettent pas d'apprécier la conductibilité du verre aux basses températures, les résistances effectives qu'il s'agit de mesurer directement atteignant quelquefois 15 ou 20 millions de mégohms. Mais, si le courant qui traverse une pareille résistance ne peut communiquer à une aiguille aimantée une déviation perceptible, il est néanmoins capable de fournir à la longue une quantité d'électricité suffisante pour donner aux armatures d'un condensateur de capacité connue une différence de potentiel appréciable. Un électromètre sensible pourra mesurer cette différence et donner ainsi une mesure de la résistance cherchée.

Mes expériences ont été exécutées avec des tubes à réaction,

Fig. 1.



fermés par un bout, de diamètre de 1 à 2^{cm} et d'épaisseur bien régulière. Le tube T contenant jusqu'à une hauteur de 3 à 6^{cm},

un liquide conducteur A plongeait dans une éprouvette E, contenant une seconde masse A' du même liquide jusqu'à la même hauteur. Le pôle positif d'une pile P était mis en communication avec le liquide extérieur A'. Le liquide intérieur A communiquait, d'une part, avec des armatures L d'un condensateur LL', d'autre part avec le mercure supérieur M de l'électromètre. Le pôle négatif de la pile était relié au mercure inférieur M' et à la seconde armature L' du condensateur. L'électricité de la pile traversait donc l'épaisseur du tube de verre pour se rendre de là dans le condensateur et l'électromètre qui se chargeaient simultanément.

Le mercure de l'électromètre se déplaçait plus ou moins lentement vers la sortie et l'on arrêtait l'expérience quand ce déplacement avait atteint une grandeur déterminée par un micromètre et correspondant à une différence de potentiel que l'on avait préalablement observée. La durée de la charge était mesurée dans chaque expérience par les battements d'un métronome.

La pile employée était une pile de Volta de 3 à 100 éléments. La différence de potentiel développée dans le condensateur et l'électromètre était, en général, voisine de $\frac{1 \text{ volt}}{100}$, ce qui est largement suffisant, puisque l'électromètre Lippmann est sensible à $\frac{1}{10000}$ de volt. Cette variation de potentiel était donc négligeable par rapport à la force électromotrice de la pile. La capacité du condensateur employé était ordinairement 1 microfarad. Le condensateur et la pile étaient portés sur des supports isolants pour éviter toute communication indirecte d'électricité à l'électromètre.

Quand on opérait à des températures ne dépassant pas 60° ou 80°, le liquide conducteur était de l'acide sulfurique concentré qui servait en même temps de matière desséchante. Les deux masses d'acide étaient reliées aux autres parties du circuit par des fils de platine contenus dans des tubes capillaires en verre jusqu'au voisinage de leur extrémité. Ces fils étaient ainsi complètement isolés des parois des vases. Tout cet appareil était entouré d'un manchon de verre qui ne présentait que les ouvertures nécessaires au passage des fils conducteurs.

On ne commençait les expériences que plusieurs heures après

l'installation. L'air intérieur du manchon et les parois des vases étaient alors bien desséchés. On le reconnaît à la concordance parfaite des résultats obtenus aux mêmes températures à des jours différents. J'ai encore obtenu des résultats identiques en faisant varier dans le rapport de 10 à 1 la hauteur de la paroi libre du tube qui surmontait les deux couches liquides, ce qui n'aurait pu avoir lieu dans l'hypothèse d'une conductibilité superficielle.

Pour opérer aux températures supérieures à 80°, où l'on n'a plus à craindre l'humidité superficielle, j'ai reconnu qu'il était avantageux de remplacer l'acide sulfurique par du mercure, parce que l'acide commence, à ces températures, à se volatiliser assez vite pour déposer pendant la durée de l'expérience une couche liquide continue sur les parois supérieures au liquide. Je me suis, du reste, assuré de l'identité des résultats obtenus en opérant successivement avec ces deux liquides entre 40° et 80°.

Pour obtenir une température uniforme et lentement variable, on installe la base de l'appareil jusqu'à un niveau notablement supérieur à celui du liquide dans un bain d'huile entouré lui-même d'un bain de sable qu'on peut échauffer progressivement. Pour les températures inférieures à la température ambiante, on remplace le bain de sable par un mélange réfrigérant. Certains verres ont pu être ainsi étudiés jusqu'à — 17°.

II. Détermination de la résistance. — Désignons par

E la force électromotrice de la pile ;

ρ_1 et ρ_2 les rayons intérieur et extérieur du tube ;

h la hauteur du liquide ;

r la résistance spécifique du verre par centimètre cube ;

c la capacité du condensateur et c' celle de l'électromètre ;

e la différence de potentiel communiquée à l'électromètre.

La quantité d'électricité transmise dans le temps θ à travers le tube de verre cylindrique est

$$\frac{2\pi h E}{r \log n \rho \frac{\rho_2}{\rho_1}} \theta.$$

D'autre part, cette quantité étant égale à la charge $(c + c')e$,

reçue par le condensateur et l'électromètre, on en déduit

$$r = \frac{2 \pi h E}{(c + c') e \log \frac{\rho_2}{\rho_1}} \theta.$$

Pour calculer la résistance, il faut connaître la capacité ajoutée au condensateur par l'électromètre. Cette capacité est toujours assez grande avec l'électromètre Lippmann.

On commençait par déterminer la capacité de l'électromètre après une minute de charge. Pour cela, on chargeait le condensateur seul pendant une minute à une différence de potentiel connue V , puis on mettait ses armatures en communication avec les deux mercures de l'électromètre pendant une autre minute. L'indication de ce dernier étant notée, on cherchait ensuite directement à quelle valeur V' du potentiel elle correspondait. La quantité d'électricité étant restée la même, on a la relation

$$cV = (c + c')V',$$

d'où l'on tire

$$c' = c \frac{V - V'}{V'}.$$

D'autres expériences ont été exécutées en disposant en cascade le condensateur et l'électromètre. On développe pendant une minute, entre les deux extrémités de la cascade, une différence électrique totale V_1 et l'on observe, dans l'électromètre, une différence plus petite V_2 . Il est facile de voir que ces quantités sont liées par la relation

$$c' = c \frac{V_1 - V_2}{V_2}.$$

Ces deux méthodes donnent très sensiblement le même résultat moyen $0^{\text{mf}}, 24$. Les écarts entre les expériences faites à des jours différents ne dépassent pas $0^{\text{mf}}, 01$, quand on a soin, avant chaque séance, de faire rentrer un instant le mercure de l'électromètre pour le mouiller sur une longueur déterminée.

Mais la capacité de l'électromètre augmente lentement avec le temps de charge, grâce à une dépolarisation progressive. La capacité du condensateur, moins sujette à variation, ne reste pas non plus absolument constante. Il importe d'éliminer ces causes d'er-

reur. Pour étudier les variations de la capacité totale $c + c' = C$, on la charge pendant une minute à un potentiel U_1 , puis on observe les positions de la colonne mercurielle de l'électromètre après 2, 3, ... minutes. On détermine les potentiels correspondants U_2, U_3, \dots . Désignons par C_1, C_2, C_3, \dots les capacités totales aux mêmes instants; on a

$$C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3 = \dots,$$

et puisque C_1 vaut $1^{\text{mf}},24$, on en déduira facilement C_2, C_3, \dots . Un procédé analogue a été employé pour les durées de charge inférieures à une minute. On peut donc dresser une Table rationnelle des corrections à apporter à la capacité suivant la durée de la charge. Après 2 minutes de charge, par exemple, la capacité totale s'est élevée de $1^{\text{mf}},24$ à $1^{\text{mf}},28$; après 3 minutes à $1^{\text{mf}},31$; après 30 secondes, elle n'est que $1^{\text{mf}},21$.

Nous avons supposé, dans le calcul de la résistance, que le verre traversé présentait la forme cylindrique. Il n'en est pas ainsi pour le fond du tube, dont l'épaisseur ne peut être, du reste, supposée uniforme. Pour éliminer cette incertitude, on opérait plusieurs fois sur le même tube aux mêmes températures, en changeant la hauteur des masses liquides conductrices.

Désignons par l et l' les hauteurs des parties cylindriques occupées par le liquide dans deux expériences différentes, et par x la hauteur d'un tube cylindrique de même rayon et de même épaisseur, dont la conductibilité serait égale à celle du fond. Les quantités d'électricité transmises dans l'unité de temps à la même température sont entre elles dans le rapport $\frac{l+x}{l'+x}$. On peut donc déterminer x et, par suite, la hauteur $h = l + x$ à introduire dans la formule.

Au moment où l'on établit le circuit, le tube de verre se charge d'abord comme un condensateur. Ses couches intérieures absorbent ensuite peu à peu une certaine charge électrique nécessaire pour les amener à l'état définitif qui correspond à la chute de potentiel établie entre les faces. Pendant cet état variable, plus ou moins prolongé suivant la nature du verre, mais ne dépassant jamais quelques minutes, les effets de la charge du verre se superposent à ceux de la conductibilité. On commence les observations

quand le temps de charge de l'électromètre a pris une valeur constante.

J'ai observé aussi qu'un échauffement rapide détermine un accroissement apparent de conductibilité plus grand que l'accroissement normal; de même un abaissement de température rapide donne naissance à une résistance exagérée. Ces phénomènes sont d'autant plus accentués que les variations de température sont plus rapides. Ils disparaissent quand on maintient quelque temps la même température et ne se produisent pas sensiblement si les variations de température sont lentes. Ces perturbations paraissent dues aux variations que subit le pouvoir diélectrique du verre sous l'influence de la température. Pour les éviter, on a exclusivement conservé les observations faites pendant le refroidissement, qu'on peut toujours rendre très lent dans les conditions de l'expérience. Ces observations fournissent des résultats parfaitement concordants, ce qui n'a pas toujours lieu pendant la période plus rapide des températures ascendantes.

Le 7 juillet 1882, un échantillon de verre a été porté en 27 minutes de 27° à 40° ; puis, après avoir atteint le maximum de 41° , a mis $2^h 2^m$ à redescendre de 40° à 27° . Dans ces conditions, on a obtenu les résultats suivants :

TABLEAU I.

Température.	DURÉE DE LA CHARGE.	
	Période	
	ascendante.	descendante.
31°	88	108
33°	73	85
35°	60	66
37°	49	54
40°	36	37

A mesure qu'on se rapproche du maximum de température, l'ascension devient plus lente et les résultats, d'abord très différents de ceux de la période descendante, s'en rapprochent de plus en plus.

III. *Résultats : Mesures absolues.* — Mes expériences ont eu

d'abord pour but des mesures absolues sur la résistance des principales variétés de verre. J'ai ensuite étudié l'influence de la trempe sur la conductibilité d'un même verre.

L'élévation de température produit toujours un accroissement très rapide de conductibilité. Les fonctions exponentielles sont celles qui se prêtent le mieux à la représentation analytique des résultats. Les formules à deux termes sont insuffisantes, parce qu'aux basses températures l'accroissement de résistance est, en général, plus rapide qu'aux températures plus élevées. On a donc représenté les expériences par des expressions de la forme

$$\log x = a - bt + ct^2.$$

Quand on opère sur divers échantillons d'une même espèce de verre, les résultats ne diffèrent pas plus entre eux que les résultats fournis par un même tube, pourvu que ces échantillons n'aient subi aucune trempe ou aient été soigneusement recuits. Quand la composition se modifie, on voit, en général, la résistance augmenter si l'on passe d'un verre à un autre de la même classe et de densité plus forte. Mais, d'une manière générale, les verres à base de plomb sont beaucoup plus isolants que les verres à base de chaux.

Les résistances de ces deux classes de verre aux mêmes températures sont, entre elles, dans des rapports de l'ordre de $\frac{1000}{1}$. Le verre de Bohême est, au contraire, en général, de 5 à 20 fois plus conducteur que le verre ordinaire.

Le Tableau II résume les observations faites sur des échantillons de chacun de ces trois verres. Les nombres qui y sont consignés représentent les résistances observées par centimètre cube en millions de mégohms.

Les résistances les plus considérables, en particulier celles du verre ordinaire aux températures inférieures à 0°, ont été mesurées avec l'électromètre seul, sans l'assistance d'un condensateur. Malgré cette diminution dans la capacité réceptrice, le temps de charge atteint plusieurs minutes. Ces résultats doivent donc être considérés comme donnant une approximation plus grossière que les autres. La résistance du verre à —17° représente à peu près deux fois celle d'un fil de cuivre de 1^{mmq} de section, allant de la Terre à Sirius.

Pour les résistances des verres à base de chaux à partir de 10°, et du cristal, à partir de 70° environ, les résultats représentent fidèlement la marche du phénomène. L'approximation pouvant atteindre aisément $\frac{1}{10}$ des chiffres obtenus, alors que la variation de résistance pour 1° C. dépasse cette fraction, on peut dire que la température correspondant à chaque résistance est évaluée à 1° près.

TABLEAU II.

Températures.	Verre de Bohême. Densité: 2,431.	Verre ordinaire. Densité: 2,539.	Cristal. Densité: 2,933.
0			
— 17.....	»	7970	»
— 15.....	330	6330	»
— 10.....	191	3530	»
— 5.....	109	1730	»
0.....	59	990	»
5.....	33	501	»
10.....	18,6	284	»
15.....	10,9	153	»
20.....	6,62	91	»
25.....	4,04	49	»
30.....	2,20	27,4	»
35.....	1,37	14,5	»
40.....	0,811	8,46	»
45.....	0,509	4,34	6650
50.....	0,299	2,39	3420
55.....	»	1,36	1920
60.....	»	0,784	988
65.....	»	»	515
70.....	»	»	288
75.....	»	»	161
80.....	»	»	98
85.....	»	»	65
90.....	»	»	39,6
95.....	»	»	25,1
100.....	»	»	16,6
105.....	»	»	11,6

Les résultats obtenus sur le verre ordinaire peuvent être représentés par la formule

$$\log x = 3,00507 - 0,052654 \times t + 0,00000373 \times t^2.$$

Le terme du second degré étant très petit, les valeurs de $\log x$ sont représentées par une ligne peu différente d'une droite. La résistance varie à peu près de $\frac{1}{9}$ de sa valeur par degré de température.

Le formule est, pour le verre de Bohême,

$$\log x = 1,78300 - 0,049530 \times t + 0,0000711 \times t^2$$

et, pour le cristal,

$$\log x = 7,22370 - 0,088014 \times t + 0,00028072 \times t^2.$$

IV. *Influence de la trempe.* — La résistance d'un échantillon de verre ne reste invariable que s'il conserve rigoureusement le même état moléculaire. Toute modification de cet état entraîne des altérations considérables dans les propriétés électriques. Ces altérations sont surtout sensibles quand on fait subir au verre une trempe plus ou moins énergique.

Mes expériences à ce sujet ont porté sur le verre ordinaire et sur le cristal trempés. Les échantillons observés étaient de petits gobelets cylindriques ou légèrement coniques, de 0^m,05 à 0^m,06 de hauteur. Après une première série de mesures, on les chauffait dans un bain de sable pendant un certain temps à une température plus ou moins élevée, puis on les laissait se refroidir lentement, et l'on répétait sur ces objets une nouvelle série de mesures aux mêmes températures que la première. Comme on ne se préoccupe pas ici de déterminer la résistance en valeur absolue, nous pouvons prendre pour mesure le temps nécessaire pour charger le condensateur à un potentiel déterminé.

Les expériences ont conduit aux résultats suivants :

1° La trempe diminue dans un rapport considérable la résistance électrique des différents verres.

Le Tableau III se rapporte à un échantillon de verre trempé à base de chaux que l'on a recuit pendant 6 heures à 500°.

Ainsi, par suite du recuit, la résistance primitive a été multipliée par 2,3.

Pour le cristal trempé, les variations sont encore plus frappantes. Le Tableau IV est relatif à deux échantillons de cristal : l'un trempé, l'autre non trempé, provenant de la même cuite et

du même creuset et recuits ensemble dans les conditions précédentes (1).

TABLEAU III.

Force électromotrice : 3^{volts},00.

Températures. °	Durée de la charge en $\frac{\text{minut.}}{100}$,		Rapport $\frac{b}{a}$.
	avant le recuit. a.	après le recuit. b.	
35.....	168	380	2,26
40.....	92	210	2,28
45.....	53	119	2,25
50.....	31	70	2,26
55.....	19	44	2,32
60.....	11,5	27	2,35
65.....	7,5	17	2,27
70.....	5	11	2,20
75.....	3	7	2,33
80.....	2	4,5	2,25

Ainsi, tandis que la résistance est devenue onze fois plus grande pour le cristal trempé, elle est restée presque stationnaire et a même légèrement diminué pour le cristal non trempé, comme si ce dernier avait pris une trempe très légère par suite de son échauffement.

D'autre part, les résistances des deux échantillons sont devenues sensiblement identiques après le recuit. La différence assez légère qu'on observe encore tient à ce que les parois de l'échantillon trempé étaient un peu plus épaisses que celles de l'autre.

2° Un recuit modéré capable de faire disparaître partiellement l'élasticité due à la trempe ne détruit qu'en partie son action sur

(1) Les éléments suivants sont entrés dans la composition de ce cristal :

	Parties.
Silice.....	100
Minium.....	62
Nitrate de potasse.....	9
Potasse.....	20
Soude.....	10
Bioxyde de manganèse.....	0,090
Arsenic.....	0,100

la résistance électrique. Le Tableau V fait connaître les résultats des expériences sur un échantillon de cristal trempé qui a été porté à 260° dans un premier recuit, puis chauffé de nouveau à 450° et maintenu pendant 2 heures à cette température.

TABLEAU IV.

Force électromotrice : 100^{volts}, 0.

Températures.	Durées de la charge en $\frac{\text{minut.}}{100}$					
	Cristal trempé			Cristal non trempé		
	avant le recuit. <i>a.</i>	après le recuit. <i>b.</i>	Rapport $\frac{b}{a}$	avant le recuit. <i>a'.</i>	après le recuit. <i>b'.</i>	Rapport $\frac{b'}{a'}$
0						
100.....	90	»	»	»	»	»
105.....	53	»	»	»	»	»
110.....	32	360	11,2	310	276	0,89
115.....	19	209	11	174	161	0,93
120.....	12	130	10,8	104	97	0,93
125.....	7,5	77	10,3	65	58	0,89
130.....	4,5	48	10,7	40	36	0,90
135.....	»	30	»	24	22	0,92
140.....	»	19	»	15	14	0,93
145.....	»	12	»	10	9	0,90
150.....	»	7,5	»	6	5,5	0,92

TABLEAU V.

Températures.	Avant le recuit.		Rapport $\frac{b}{a}$	Chauffé à 260°. <i>c.</i>	Rapport		Rapport $\frac{d}{a}$
	1 ^{re} série.	2 ^e série.			$\frac{c}{a}$	Chauffé à 450°. <i>d.</i>	
	<i>a.</i>	<i>b.</i>					
0							
90.....	130	133	1,02	245	1,88	»	»
95.....	78	79	1,01	140	1,79	»	»
100.....	46	48	1,04	81	1,76	355	7,7
105.....	27,5	28	1,02	50	1,82	210	7,6
110.....	17	18	1,06	29,5	1,74	122	7,2
115.....	10,5	11	1,05	18,5	1,76	72	6,9
120.....	6,5	7	1,08	12	1,85	45	6,9
125.....	»	»	»	7,5	»	29	»
130.....	»	»	»	4,5	»	19	»
135.....	»	»	»	»	»	12	»
140.....	»	»	»	»	»	7,5	»

Entre les deux premières séries il n'y a pas eu de recuit. La résistance est demeurée sensiblement invariable. La légère augmentation de résistance signalée, si elle n'est pas due entièrement aux erreurs d'observation, peut être attribuée à un premier recuit très faible, le vase ayant été une première fois chauffé à 120°. Après l'échauffement à 260°, on observe, au contraire, un accroissement notable de la résistance qui devient en moyenne 1,8 de sa valeur primitive. Après l'échauffement à 450°, la résistance s'est accrue dans le rapport beaucoup plus considérable de 1 à 7,2.

3° La résistance d'un verre récemment recuit continue d'augmenter lentement pendant quelque temps, comme s'il se rapprochait peu à peu d'un état d'équilibre définitif.

Les résultats suivants (Tableau VI) concernent un vase de cristal primitivement trempé, puis recuit le 28 novembre 1882, à 400°.

TABLEAU VI.

Températures.	1 ^{re} série 29 nov. <i>a.</i>	2 ^e série 29 nov. <i>b.</i>	3 ^e série 30 nov. <i>c.</i>	4 ^e série 7 déc. <i>d.</i>	Rapport $\frac{d}{a}$.
105.....	59	63	»	92	1,56
110.....	36	38	41	54	1,50
116.....	20	21	22	29,5	1,47
120.....	13	14	15	20	1,54

Au bout de neuf jours, la résistance du vase recuit s'est donc accrue de la moitié de sa valeur initiale, le travail moléculaire ayant continué de s'effectuer.

TABLEAU VII.

Températures.	1 ^{re} série. 11 déc. 1882.	2 ^e série. 1 ^{er} février 1883.
90.....	73	70
95.....	42	42
100.....	26	25
105.....	16	16
110.....	10	10
115.....	6	6,5
120.....	4	4

4° La résistance d'un verre trempé ou non qui n'a pas été chauffé depuis longtemps demeure invariable. En ce qui concerne les

verres non trempés, ce fait est établi par la concordance des résultats obtenus sur les diverses variétés de verre. Le Tableau VII, donne les résultats fournis par un même vase de cristal trempé, à cinquante-deux jours de distance.

De l'ensemble des résultats fournis par ces recherches, on peut conclure, au point de vue pratique, que les meilleurs isolateurs en verre sont donnés par les verres à base de plomb, et qu'il conviendra de recuire avec beaucoup de soin les pièces qui constituent ces isolateurs.
