

§ 5. — *Mesure du débit d'électricité en fonction du potentiel.*

Le débit d'électricité provoqué par le rayonnement de l'uranium est fonction du potentiel des corps électrisés. Nous verrons plus loin qu'il dépend de l'intensité du champ électrique produit dans les gaz qui absorbent le rayonnement; mais avant que cette notion fût bien établie, la recherche d'une relation entre le débit et le potentiel des corps électrisés a présenté diverses difficultés.

J'en fait à ce sujet deux séries de mesures : les premières avec un électroscope à feuilles d'or; les secondes avec un électromètre à quadrants; le premier instrument a dû être préalablement gradué, et cette opération a été assez difficile, mais l'appareil présentait un isolement remarquable : au contraire j'ai eu quelque peine à réaliser un isolement suffisant dans un électromètre à quadrants. Si V est le potentiel d'un système, C sa capacité, la valeur

du débit est $- C \frac{dV}{dt}$. Or il arrive, surtout pour l'électroscope à feuilles d'or, que la capacité de cet instrument est variable avec la position des feuilles d'or, de telle sorte qu'il a fallu faire pour cet appareil une graduation appropriée.

La meilleure méthode pour mesurer le débit eût été l'emploi d'un galvanomètre; mais le rayonnement de l'uranium était trop faible pour que ce moyen de mesure pût être employé. Dans diverses expériences, entre autres dans un essai fait le 10 février 1897, j'ai reconnu que les traces de courant que l'on pouvait déceler correspondaient à la limite de la sensibilité des galvanomètres que je possédais, et ne pouvaient servir à des mesures dans les conditions que je pouvais réaliser.

1° *Mesures avec l'électroscope à feuilles d'or.* — Comme je viens de le dire, il a fallu préalablement graduer l'électroscope et en particulier déterminer les potentiels qui correspondaient à des divergences déterminées des feuilles d'or. On a employé à cet effet une méthode dérivée de celle de l'électroscope condensateur de Volta. Le bouton de l'électroscope a été mis en communication avec l'un des plateaux de cuivre d'un condensateur à air. Ce plateau avait 10^c,8 de rayon; il était parfaitement isolé et au-dessus se trouvait un plateau plus grand, mobile, pouvant s'éloigner du premier en lui restant parallèle. Trois cales de papier paraffiné permettaient d'amener les plateaux à une distance d'environ 0^{mm},33; puis on les chargeait avec une pile de 5 à 25 éléments, et on écartait les plateaux à 3^c,4. Si la capacité seule du condensateur inter-

venait, le potentiel du plateau isolé serait alors celui de la pile multiplié par le rapport inverse des distances, soit 103.

En tenant compte de la capacité du fil de jonction, ainsi que de celle de l'électroscope et des faibles variations de celle-ci, on a pu dresser un tableau de valeurs approximatives des potentiels correspondant aux diverses déviations des feuilles d'or.

Ce tableau une fois dressé, on a disposé au-dessus du bouton de l'électroscope le disque d'uranium dont il a été question plus haut, et on a étudié la vitesse de la décharge en chargeant l'électroscope puis en abandonnant ce système à lui-même et en déterminant en divers instants les positions des feuilles d'or. Pour éviter de tenir compte des variations de la capacité de l'électroscope on avait relié celui-ci à l'une des armatures d'un condensateur dont la capacité était suffisante pour rendre négligeable la variation due à l'électroscope.

On a ainsi obtenu les résultats suivants, corrigés de la déperdition de l'appareil; celle-ci était déterminée en retirant le disque d'uranium et en abandonnant à lui-même le système chargé (1).

(1) Dans la publication des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 444, les corrections n'avaient pas été faites, ni pour les potentiels, ni pour la déperdition des appareils.

DÉPERDITION PROVOQUÉE PAR LE DISQUE D'URANIUM

ÉLECTROSCOPE A FEUILLES D'OR ET CONDENSATEUR

Expériences du 1^{er} mars 1897.

DÉVIATIONS.		POTENTIELS EN VOLTS.		MOYENNES des observations.	Δt	MOYENNES des Δt successifs.	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	DÉPERDITION des appareils.	$\frac{dV}{dt}$	$\frac{dV}{dt}$
	α	V	ΔV	t		Δt					
	deg.										
100	20	1801,8	»	0 sec	»	»	»	»	»	»	»
99,5	19	1730,3	71,5	13,9	15,9	15,9	4,49	4,49	0,59	3,90	3,90
99	18	1658,2	72,1	31,9	16	16,1	4,50	4,48	0,56	3,94	3,92
98,5	17	1585,0	73,2	48	16,1	16,3	4,54	4,49	0,53	4,01	3,96
98	16	1511,0	74	64,2	16,2	16,5	4,57	4,48	0,49	4,08	3,99
97,5	15	1436,0	75	80,5	16,3	16,7	4,60	4,49	0,46	4,14	4,03
97	14	1359,9	76,1	97	16,5	17	4,61	4,47	0,42	4,19	4,05
96,5	13	1282,7	77,2	114	17	17,1	4,54	4,51	0,39	4,15	4,12
96	12	1204,0	78,7	131,5	17,5	17,5	4,44	4,44	0,36	4,08	4,08
95,5	11	1124,0	80	149,6	18,1	17,7	4,42	4,52	0,33	4,11	4,19
95	10	1042,5	81,5	168	18,4	18,2	4,42	4,48	0,30	4,12	4,18
94,5	9	958,8	83,7	187	19	18,8	4,40	4,45	0,27	4,13	4,18
94	8	872,6	86,2	207	20	19,6	4,31	4,40	0,24	4,07	4,16
93,5	7	782,9	89,7	228	21	20,6	4,27	4,35	0,21	4,06	4,14
93	6	689,3	93,6	252,6	23,6	21,7	3,96	4,31	0,18	3,78	4,13
92,5	5	590,6	98,7	276,3	23,7	23,4	4,16	4,22	0,15	4,01	4,07
92	4	486,2	104,4	301,3	25	25	4,18	4,18	0,12	4,06	4,06
91,5	3	375,4	110,8	330,5	29,2	29,2	4,47	4,47	0,09	4,38	4,38
91	2	256,7	118,7	366,6	35,1	35,1	3,38	3,38	0,06	3,32	3,32
90,5	1	128,7	128	413,3	46,7	46,7	2,75	2,75	0,00	2,75	2,75

Le résultat fondamental mis en évidence par ce tableau est la constance de la vitesse de déperdition $\frac{dV}{dt}$, et par suite la constance du débit d'électricité provoqué par l'uranium, pour des potentiels supérieurs à 300 volts.

Il n'en est pas de même lorsque le potentiel des corps électrisés est faible. Voici, entre autres, les résultats d'une série faite le 28 janvier 1897 en déchargeant, au moyen du même disque d'uranium, un électroscope à une seule

feuille d'or mobile entre deux plateaux électrisés; les déplacements de la feuille étaient observés avec un microscope muni d'un micromètre oculaire. Les deux plateaux étaient maintenus à des potentiels constants soit par des piles sèches, soit par une pile à eau. Cet appareil (électroscope, n° 2, fig. 10) était réuni avec un condensateur de capacité suffisante pour que les variations de la capacité de l'électroscope fussent négligeables. (Dans la fig. 10 ci-contre, l'électromètre est représenté à gauche; la partie

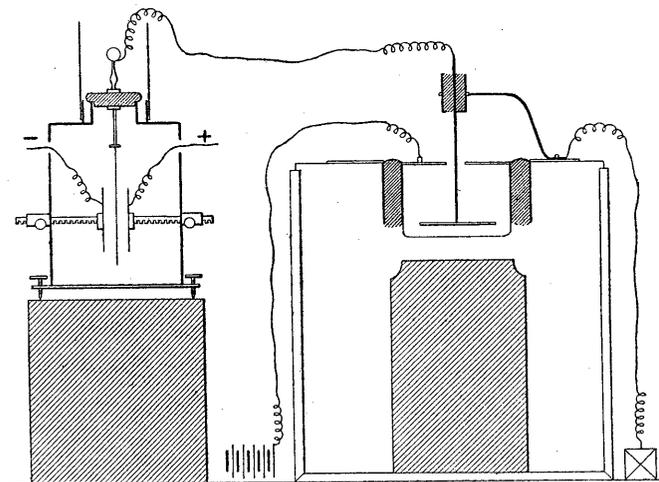


Fig. 10.

droite de la figure est relative à un dispositif qui sera décrit plus loin.) La capacité de ce condensateur n'étant pas exactement la même que celle du système étudié dans le tableau précédent, les nombres ne sont pas directement comparables.

DÉCHARGE PAR LE DISQUE D'URANIUM

Électroscope n° 2 et condensateur.

VOLTAGE MOYEN. V_1	MICRO- MÈTRE.	POTENTIELS. V	ΔV	TEMPS OBSERVÉS. t	Δt	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	$\frac{I}{V_1} \frac{\Delta V}{\Delta t}$
		v.	v.	m. s.			
»	50	15,00	»	0	»	»	»
14,35	45	13,70	1,30	13	13	0,1000	0,00696
13,00	40	12,30	1,40	26,5	13,5	0,1037	0,00798
11,57	35	10,85	1,45	42	15,5	0,0935	0,00808
10,09	30	9,33	1,52	59,5	17,5	0,0868	0,00864
8,56	25	7,79	1,54	1 19	19,5	0,0790	0,00922
7,00	20	6,21	1,58	1 44	25	0,0632	0,00900
5,43	15	4,65	1,56	2 16,5	32,5	0,0480	0,00884
3,87	10	3,10	1,55	3 5	48,5	0,0319	0,00824
2,63	7	2,16	0,94	3 51	46	0,0204	0,00775
1,85	5	1,54	0,62	4 36	45	0,0138	0,00746

On voit combien, dans ces conditions, le débit varie avec le potentiel, auquel il est à peu près proportionnel.

J'ai cité ces nombres pour montrer le parti que l'on peut tirer de l'électroscope à feuilles d'or. Malgré la grande incertitude qui règne pour l'évaluation des forts potentiels, j'avais conservé l'usage de cet instrument en raison de son excellent isolement.

Au cours des études de graduation j'ai reconnu que dans les conditions des expériences la variation de potentiel pour une même variation angulaire, $\frac{\Delta V}{\Delta \alpha}$ était sensiblement en raison inverse de la capacité de l'électroscope seul, de sorte que si C_1 est la capacité de cet appareil, on a très sensiblement $C_1 \frac{dV}{d\alpha} = C^{te}$. Or, dans un grand nombre d'expériences, soit avec les rayons X, soit avec l'uranium agis-

sant sur le bouton de l'électroscope, on avait reconnu que, pour des potentiels élevés, on avait très sensiblement $\frac{d\alpha}{dt} = C^{te}$. Il résulte de la remarque qui précède que l'on

doit avoir également $C_1 \frac{dV}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = C_1 \frac{dV}{dt} = C^{te}$, c'est-à-dire

que dans ces expériences le débit d'électricité est indépendant du potentiel quand celui-ci est suffisamment grand.

2° *Mesures avec l'électromètre à quadrants.*

Les déterminations précédentes relativement grossières n'étaient pas suffisantes pour établir comment variait la chute du potentiel des corps électrisés soumis à l'influence du rayonnement de l'uranium lorsque ceux-ci sont portés à des potentiels variables. Pour cette étude il importait de réaliser deux conditions fondamentales : 1° un isolement convenable du système dont on étudiait la déperdition; 2° une disposition telle que la capacité fût pratiquement constante.

L'appareil le plus parfait pour les mesures de potentiels est l'électromètre à quadrants. J'ai d'abord eu quelque peine à réaliser un électromètre à quadrants ayant un isolement convenable. Cependant un appareil construit par M. Boudréaux et dont toutes les pièces sont isolées par des supports en paraffine entourés de manchons de cuivre reliés à la terre a pu donner de bonnes mesures. Ces séries ont été exécutées au laboratoire de physique de l'École polytechnique (1).

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 800, 12 avril 1899.

On a choisi, pour étudier la déperdition, le cas simple d'une sphère d'uranium suspendue dans l'air à une distance relativement grande des corps environnants et reliée à l'aiguille de l'électromètre à quadrants dont il vient d'être question. La sphère avait $13^{\text{mm}},7$ de diamètre et par suite une surface de $5^{\text{cm}},89647$: l'ensemble de la sphère et de l'aiguille de l'électromètre était aussi bien isolé que possible. Les paires de quadrants étaient en relation avec les deux pôles d'une pile dont le milieu était à la terre.

Si l'on définit la capacité de l'aiguille par le rapport de la charge qu'elle prend au potentiel qu'elle indique, cette grandeur est fonction des potentiels des quadrants et de la position que l'aiguille occupe par rapport à ceux-ci. Cependant si les déviations sont proportionnelles aux potentiels et si les potentiels des quadrants sont constants, la capacité de l'aiguille est constante. On peut démontrer facilement cette propriété de la manière suivante :

Soient V_1 et V_2 les potentiels des quadrants, v le potentiel de l'aiguille, θ l'angle de déviation de l'aiguille proportionnelle au couple de torsion qui fait équilibre aux couples électrostatiques. On sait que l'on a, en désignant par K_0 une constante caractéristique de l'appareil :

$$\theta = K_0 (V_1 - V_2) [v - (V_1 + V_2)].$$

Si nous supposons que le milieu de la pile qui charge les quadrants soit mis à la terre, on a $V_1 + V_2 = 0$
d'où

$$V_2 = -V_1$$

et l'expression de θ devient proportionnelle à v .

$$\theta = 2 K_0 V_1 v.$$

Supposons encore que, dans la position d'équilibre, pour $v = 0$, des portions égales de l'aiguille pénètrent dans chaque quadrant. Soit A (fig. 11) l'angle au centre du secteur qui constitue l'aiguille, et α l'angle au centre du secteur engagé dans la paire de qua-

drants V_1 ; on a $\theta = \frac{A}{2} - \alpha$. La surface de l'aiguille engagée dans la paire de quadrants V_1 , se compose de quatre surfaces de secteurs ayant pour angle au centre α , elle est donc égale à $4 \pi r^2 \alpha = S_1$, r étant le rayon du secteur. Sur cette surface la densité

électrique ϵ_1 , est égale à $\frac{1}{4\pi} \frac{v - V_1}{e}$ en désignant par e la distance de l'aiguille aux plateaux inférieur et supérieur des quadrants; la quantité d'électricité sur cette portion du secteur est donc

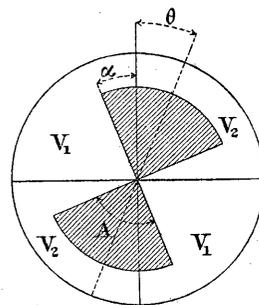


Fig. 11.

$$q_1 = S_1 \epsilon_1 = \frac{r^2}{e} \alpha (v - V_1) = K_1 \alpha (v - V_1).$$

On aurait de même pour l'autre secteur dont l'angle au centre est $(A - \alpha)$

$$q_2 = K_1 (A - \alpha) (v - V_2) = K_1 (A - \alpha) (v + V_1).$$

Si l'on désigne par C , la capacité de l'aiguille définie comme il a été dit ci-dessus, on a :

$$Cv = q_1 + q_2 = K_1 [\alpha(v - V_1) + (A - \alpha)(v + V_1)] = K_1 [Av + (A - 2\alpha)V_1].$$

or, nous avons vu que l'on avait

$$A - 2\alpha = 2\theta = 4K_0 V_1 v,$$

il vient donc, en divisant les deux membres par v ,

$$C = K_1 [A + 4K_0 V_1^2].$$

Pour des valeurs déterminées $\pm V_1$ du potentiel des quadrants, la capacité C est indépendante de l'angle θ et par suite indépendante du potentiel v de l'aiguille, ce qui est la condition que nous cherchions à réaliser.

Si d'une série à une autre on fait varier la charge des quadrants pour faire varier la sensibilité de l'instrument, la capacité de l'aiguille change et les résultats obtenus dans les mesures ne sont plus directement comparables.

La difficulté, soit de maintenir constantes, soit de mesurer les capacités des systèmes étudiés, capacités qu'il fallait rendre nécessairement très faibles pour que la valeur de $\frac{dv}{dt}$ ne fût pas par trop petite, ont rendu les mesures assez délicates. On a représenté graphiquement les résultats obtenus et on a tracé des courbes moyennes qui éliminent en partie les erreurs accidentelles dues aux imperfections de l'électromètre.

L'isolement électrique n'étant pas complet, on a étudié séparément la déperdition par les supports, et la vitesse de déperdition due à cette cause a été retranchée de la vitesse observée, pour avoir l'effet dû à l'uranium.

Les piles qui ont servi à graduer l'instrument étaient des piles zinc, cuivre, eau et glycérine, montées depuis plusieurs années; chaque élément valait en moyenne $0^{\text{volt}},93$. Les nombres suivants sont donnés en prenant ces éléments de pile pour unité de potentiel.

Avec une première disposition les quadrants étant chargés par une pile de 64 éléments dont le milieu était à la terre, ($V_1 = 32$) on a eu les nombres suivants qui résument de nombreuses mesures :

Potentiels.	CHUTE DE POTENTIEL EN UNE SECONDE	
	observée.	corrigée de la déperdition.
ε 35,25	ε 0,1940	ε 0,187
32,15	0,1884	0,182
29,0	0,1832	0,177
27,4	0,1770	0,175
21,2	0,1670	0,164
17,8	0,1615	0,159
14,5	0,1535	0,152
11,32	0,1384	0,137
8,12	0,1191	0,118
5,70	0,1018	0,101
4,05	0,0880	0,088
2,43	0,0609	0,061
1,20	0,0340	0,034

Une seconde série a été faite dans des conditions un peu différentes en chargeant les quadrants avec une pile de 8 éléments, dont le milieu était à la terre ($V_1 = 4$). On a eu des déviations dans les mêmes limites que les pré-

cédentes, mais pour des potentiels plus élevés. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Potentiels. ϵ	CHUTE DE POTENTIEL EN UNE SECONDE	
	observée. ϵ	corrigée de la déperdition. ϵ
227	0,2778	0,233
206,5	0,2744	0,233
175,5	0,2673	0,232
145	0,2592	0,230
114	0,2470	0,224
93,8	0,2376	0,219
72,6	0,2253	0,211
62,3	0,2188	0,206
52	0,2103	0,199
36,5	0,1929	0,185
26,2	0,1754	0,170
21	0,1634	0,159
15,7	0,1487	0,145

Les comparaisons entre les valeurs communes aux deux séries montrent que dans la seconde la capacité était environ 1,03 plus grande que dans la première. La vitesse maximum de la chute du potentiel a été $0,233 \times 0^v,93 = 0^v,216$ pour la seconde série.

Dans la publication rappelée plus haut, j'avais relié les résultats des mesures faites à différents potentiels, par la formule empirique

$$\frac{dV}{dt} \left(a + \frac{b}{V} \right) = -1$$

En observant qu'à la surface d'une sphère de rayon R la force F a pour valeur $F = \frac{V}{R}$, cette formule peut encore s'écrire

$$i = -C \frac{dV}{dt} = \frac{C}{a + \frac{b}{RF}} = \frac{F}{mF + n},$$

montrant que le courant i tend vers une valeur constante quand la force du champ a une valeur suffisamment grande; a et b étant proportionnels à C , la valeur limite de i est indépendante de la capacité et du champ. Ce courant a été appelé plus tard par M. Rutherford, *courant de saturation* (1).

On peut déduire de ces déterminations une valeur approchée du débit d'électricité provoqué par le rayonnement de l'uranium dans l'air. L'expression de la force électrique dans l'air à la surface de la sphère est $F = \frac{V}{R} = \frac{V}{0,685}$. Pour 200 volts on a $F = 2,92 \cdot 10^{10}$ unités électromagnétiques ou environ une unité électrostatique C.G.S.

Le débit a pour expression $i = -C \frac{dV}{dt}$; la plus grande difficulté consiste à évaluer avec une approximation suffisante la capacité C . Dans les conditions de la première série ci-dessus, on a réuni le système de la sphère d'uranium et de l'électromètre avec une sphère de 8^e,116 de rayon, au moyen d'un fil. Le potentiel a été réduit à 0,386 de sa valeur. Dans ces nouvelles conditions la vitesse de déperdition du système était les 0,33 de sa valeur sans l'adjonction de la sphère. En admettant comme plus précise la mesure électrostatique, et en tenant compte de la capacité du fil qui porte à 10^e la valeur de la capacité ajoutée, on trouve que la capacité du système de l'électromètre et de la

(1) *Philosophical Magazine*, vol. XLVII, p. 109, janvier 1899.

sphère d'uranium est environ 6,28 unités électrostatiques. Pour la disposition de la deuxième série, la capacité serait $6,28 \times 1,03 = 6,47$. La chute de potentiel correspondante $0^v,216$ équivaut à $\frac{0,216}{300} = 7,2 \cdot 10^{-4}$ unités électrostatiques.

Le débit est alors $6,47 \times 7,2 \cdot 10^{-4} = 4,658 \cdot 10^{-3}$ unités électrostatiques ou, en unités électromagnétiques, $\frac{4,658}{3} \cdot 10^{-13} = 1,55 \cdot 10^{-13}$.

Une expérience antérieure du 12 février 1897 avec la même sphère d'uranium et avec des appareils entièrement différents avait conduit à évaluer le débit de la sphère d'uranium dans l'air à $1,6 \cdot 10^{-13}$ unités électromagnétiques, valeur voisine de la précédente.

Le nombre $1,55 \cdot 10^{-13}$ est relatif à la surface de la sphère qui est de $5^{\text{cm}},896$. Pour un centimètre carré, on aurait

$$i = 0,26 \cdot 10^{-13} (\text{C.G.S.}) = 2,6 \cdot 10^{-13} \text{ ampères,}$$

nombre qui indique seulement l'ordre de grandeur du courant.