Un dipôle passif symétrique :

LA LAMPE A INCANDESCENCE

par Marc CHAPELET,
La Celle-Saint-Cloud.

Le programme d'Electricité, en classe de Seconde, spécifie qu'on étudie quelques dipôles passifs et qu'on représente leurs caractéristiques. L'étude est limitée le plus souvent aux conducteurs ohmiques, aux diodes silicium ou germanium, aux diodes Zener et aux varistances. Curieusement, l'étude de la lampe à incandescence à filament de tungstène est généralement délaissée.

1. CARACTERISTIQUE INTENSITE - TENSION D'UNE LAMPE A INCANDESCENCE A FILAMENT DE TUNGSTENE.

Les lampes utilisées sont du type : 6,5 V - 0,1 A ; 6 V - 0,2 ou 0,3 A ; 3,5 V - 0,2 ou 0,3 A... Le circuit est un montage à courte dérivation, puisque les valeurs de la résistance de la lampe sont petites (de 1 à 100 Ω). L'alimentation de la lampe est réalisée par un montage potentiométrique. Les relevés de l'intensité i et de la tension u aux bornes de la lampe, qui ont permis de dresser la courbe 1, ont été effectués avec des multimètres numériques de grande précision (0,2 %). Les courbes obtenues par les élèves, à l'aide d'ampèremètres et de voltmètres ordinaires, sont aussi de bonne qualité.

On constate sur la fig. 1 et en se référant aux valeurs du tableau en annexe, que la résistance du filament de la lampe croît avec l'intensité i du courant et donc avec la température du filament [1]. Ceci est dû à l'influence de la température sur la mobilité des électrons dans un conducteur métallique : dans un métal pur, exempt de défauts dans le réseau cristallin, la résistivité et donc la résistance augmentent linéairement avec la température absolue T, si celle-ci n'est pas trop basse (ordre de grandeur : $T > 300$ K) [2] [3]. En effet, seules, les vibrations du réseau cristallin d'origine thermique peuvent s'opposer, dans un métal pur, au déplacement des électrons libres.

Pour un métal contenant des impuretés ou des irrégularités dans la structure du réseau, la résistivité ϱ est la somme de deux termes :

$$\varrho = \varrho_0 + A\,T = \varrho_0 + \varrho_0\,\alpha\,T$$

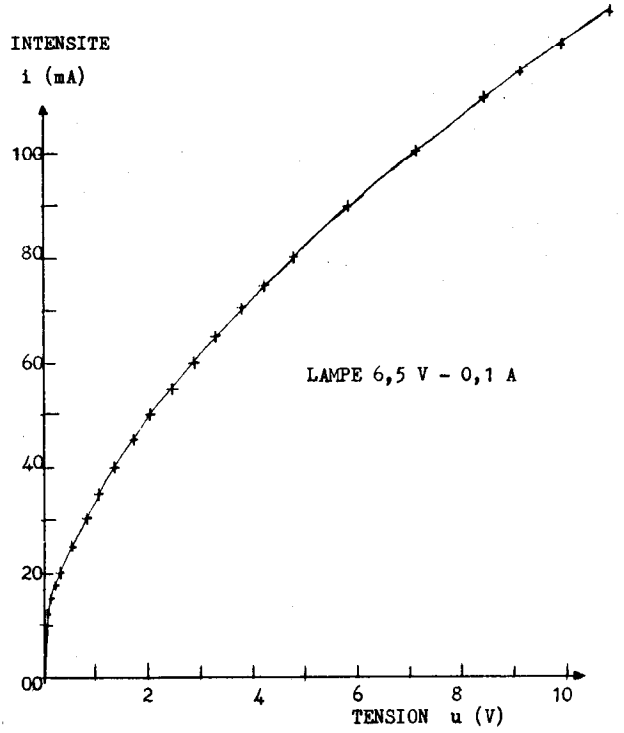

Fig. 1. — Caractéristique point par point d'une lampe à incandescence à filament de tungstène.

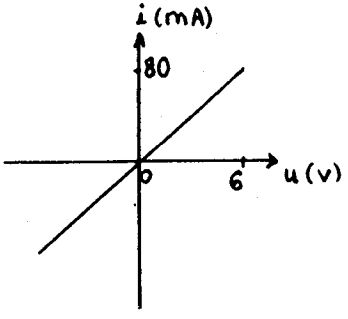

Fig. 2. — Caractéristique à l'oscillographe, $i = f(u)$ d'une lampe à filament de tungstène (6,5 V - 0,1 A) obtenue à l'aide d'une alimentation délivrant un signal alternatif (50 Hz, amplitude 6 V). A cette fréquence, la température et la résistance du filament n'ont pas le temps de se modifier (valeur de R : 75 Ω).

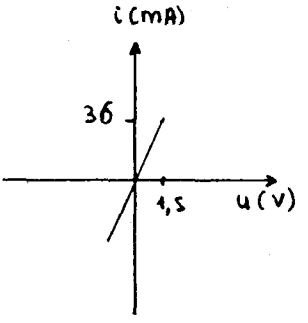

Fig. 3. — Courbe analogue obtenue avec un signal d'amplitude 1,5 V ; valeur de R : 40 Ω. La valeur de la résistance de la lampe 6,5 V - 0,1 A dépend de l'amplitude de la tension d'alimentation.

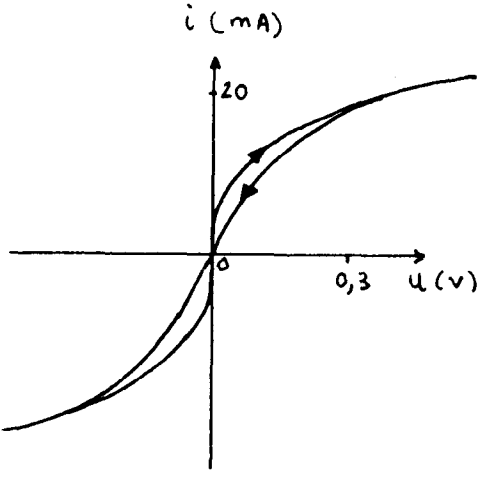

Fig. 4. — Caractéristique à l'oscillographe, $i = f(u)$ d'une lampe 6,5 V - 0,1 A, obtenue en faisant varier la tension d'alimentation très lentement (une dizaine de secondes), en augmentant u, puis en diminuant (sens des flèches). La caractéristique est symétrique.

où ϱ_0 est la résistivité résiduelle ; le terme proportionnel à T étant prédominant aux températures élevées. Pour les métaux purs, α est voisin du coefficient de dilatation des gaz parfaits (résultat de physique atomique) soit 1/273,15 (en fait, valeurs de α : 1/300 à 1/250 [2] [5]). Dans le cas d'un filament de tungstène, dès que le fil rougit, la résistivité croît approximativement comme T [6].

2. REMARQUES CONCERNANT LE TRACE DE LA CARACTERISTIQUE.

La caractéristique d'une lampe (0,5 à 1 W) ne peut pas être visualisée à l'oscilloscope à l'aide d'un générateur de signaux alternatifs habituel, qui délivre généralement une puissance insuffisante pour engendrer l'allumage de la lampe. Si on alimente la lampe avec une alimentation secteur (6 V - 1 A, alternatif 50 Hz), la puissance fournie est suffisante pour allumer la lampe, mais le balayage de la caractéristique est trop rapide pour que la lampe puisse refroidir lorsque i et u s'annulent. La caractéristique a alors l'aspect représenté sur les fig. 2 et 3.

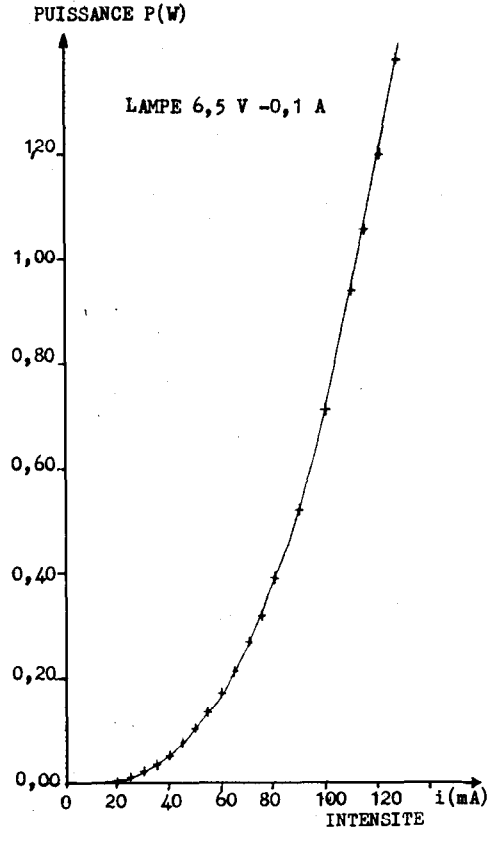

Fig. 5. — Courbe représentant la puissance électrique en fonction de l'intensité, pour une lampe à incandescence à filament de tungstène.

Le tracé de la caractéristique effectué lentement (en quelques secondes) à partir du point ($i = 0$; $u = 0$) (la lampe est donc froide) vers le point $u = 0{,}4$ V n'est pas identique au tracé inverse réalisé dans les mêmes conditions, de $u = 0{,}4$ vers 0 V (fig. 4). Mais dès que u dépasse 0,4 V, les tracés ascendant et descendant coïncident. Ceci est dû à la lenteur de la mise en régime de la lampe [7]. Ce phénomène passe évidemment inaperçu quand on relève les valeurs de i et de u point par point, car l'opération est alors très lente.

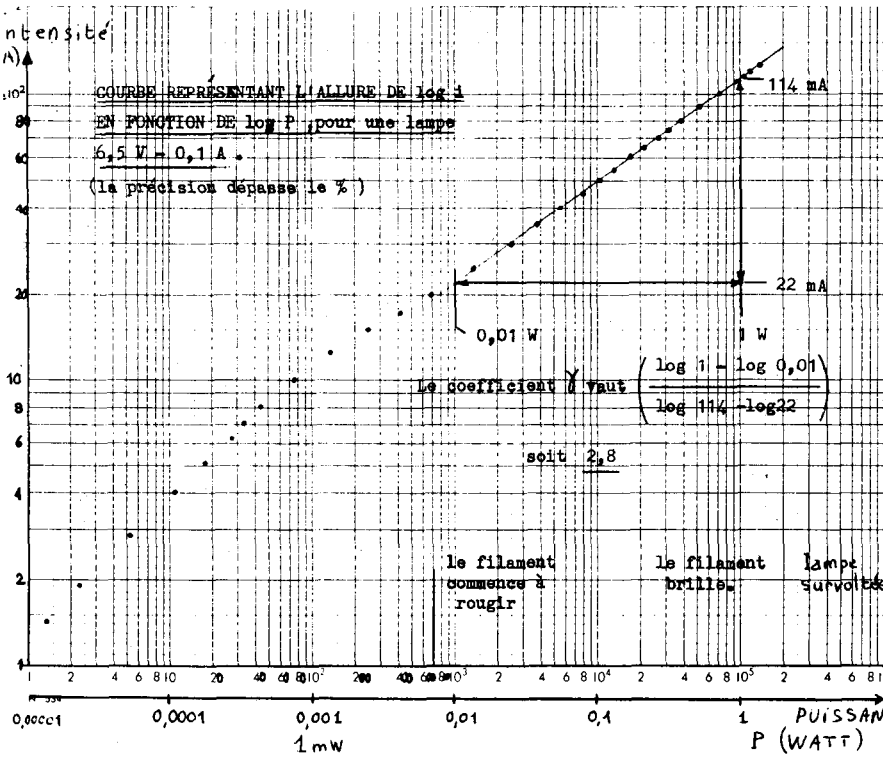

Fig. 6. — Courbe et relation intensité-puissance en coordonnées log-log.

3. PUISSANCE P = u i EN FONCTION DE L'INTENSITE i.

Cette étude n'est pas au programme de la classe de Seconde, même si la notion de puissance électrique et la formule $P = ui$ sont vues en Quatrième. La fig. 5 montre l'allure de P en fonction de l'intensité i. Si on représente P et i en coordonnées log-

log, on obtient une droite dans la zone où le filament brille (fig. 6). La loi suivie peut donc s'écrire sous la forme :

$$\log P = \gamma \log i + \text{constante} \quad \text{soit :} \quad P = a\, i^{\gamma}.$$

L'exposant γ est déterminé par la pente en coordonnées log-log. Pour diverses lampes de faible puissance et de basse tension, les différentes mesures ont conduit à $\gamma = 2{,}75 \pm 0{,}10$. (En classe de Première S, on pourra représenter P en fonction de i et, mieux, P en fonction de $i^{2{,}8}$).

4. INTERPRETATION.

4.1. Interprétation élémentaire.

Aux hautes températures (de 450 °C à 2 400 °C), les modèles théoriques de la conductivité électrique des métaux conduisent à une variation en T de la résistivité et de la résistance R de la lampe (la modification de R par la dilatation thermique des dimensions du filament de tungstène peut être négligée ; jusqu'à 2 000 °C [6], la dilatation du fil est quasi linéaire en température, le coefficient de dilatation valant $5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}).

La puissance $P = R\, i^2$ varie alors comme $T\, i^2$. Si on suppose, une fois le régime d'équilibre atteint, que l'on puisse assimiler la lampe à un corps noir (approximation assez grossière [8] [9]), la puissance lumineuse varie alors comme T^4 (loi de Stefan).

Donc $T\, i^2$ varie comme T^4, T varie alors comme $i^{2/3}$ et donc la puissance P varie en $i^{8/3}$. La valeur de γ est donc de 8/3 soit 2,67 ; cette valeur est en bon accord avec les valeurs expérimentales.

4.2. Lois empiriques expérimentales.

Les nombreux travaux entrepris dès le début du siècle ont montré expérimentalement que la résistance d'un fil de tungstène ne variait pas comme T mais plutôt en $T^{1{,}20}$ si : $1\,200\ K < T < 2\,800\ K$ [6] ; que la puissance électrique variait en i^{γ} (avec γ : de 2,65 à 2,9) ; que la lampe à filament de tungstène ne se comportait pas comme un corps noir : puissance lumineuse en T^5 (de 1 700 à 2 800 K) [6] [9] [10].

Il est important de remarquer que ces résultats dépendent de la pureté du tungstène choisi.

Je tiens à remercier Monsieur GUILLOUX, technicien au laboratoire du lycée Hoche à Versailles, pour l'aide matérielle apportée et Monsieur PRIEUR de l'Association Française de l'Eclairage pour ses judicieux conseils.

ANNEXE :

VALEURS NUMERIQUES DETERMINEES EXPERIMENTALEMENT.

La précision porte sur le dernier chiffre.

i (mA)	u (V)	P = i (mW)	i (mA)	u (V)	P = i (mW)
126,9	10,87	1379	25,0	0,561	14,0
120,7	9,95	1201	20,1	0,347	7,0
115,3	9,16	1057	17,5	0,237	4,15
110,5	8,49	938	15,1	0,162	2,45
100,2	7,13	714	12,6	0,110	1,39
89,6	5,83	522	10,0	0,077	0,77
80,4	4,82	387	8,00	0,057	0,45
74,8	4,25	318	7,02	0,049	0,34
70,5	3,82	269	6,26	0,043	0,27
65,0	3,31	215	5,14	0,0345	0,18
60,1	2,88	173	4,06	0,027	0,11
55,1	2,47	136	2,85	0,0185	0,053
50,0	2,07	103,5	1,90	0,0123	0,023
45,4	1,74	79,0	1,42	0,0092	0,013
40,1	1,39	55,7	0,94	0,0061	0,006
35,0	1,08	37,8	0,51	0,0033	0,002
30,4	0,831	25,3	0,00	0,0000	0,000

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Physique Pratique.* Tome 1, *Electricité* (éd. Vuibert, 1974), p. 89-94.

[2] M. BERTIN, J.-P. FAROUX, J. RENAULT. — *Electromagnétisme* (éd. Dunod, 1979), p. 30-31.

[3] R. CASTAING. — *Thermodynamique Statistique* (éd. Masson, 1970), p. 331-333.

[4] A. GUINIER, E. GUYON, J. MATRICON, C. TAUPIN. — *Propriétés électroniques des solides,* bull. n° 550, déc. 1972, p. 277-335.

[5] C. KITTEL. — *Introduction à la physique de l'état solide* (éd. Dunod, 1972), p. 256-261.

[6] COLIN, J. SMITHELLS. — *Tungsten* (Chapman et Hall, 1952), chapitre VIII.

[7] Communication A.F.E.

[8] G. BRUHAT. — *Thermodynamique* (éd. Masson, 1962), chapitre 164, p. 640-650.

[9] *Standard handbook for electrical engineers* (Mc Graw-Hills, 1949), section 16, p. 15-27 : *characteristics of electric lamps.*

[10] JONES, LANGMUIR. — *Gen. Elec. Rev.* 1927, vol. 30, 354, 408.