



**HAL**  
open science

## Résistances et capacité internes d'une photopile au sélénium aux basses températures.

G. Blet

► **To cite this version:**

G. Blet. Résistances et capacité internes d'une photopile au sélénium aux basses températures.. Journal de Physique et le Radium, 1957, 18 (10), pp.572-578. 10.1051/jphysrad:019570018010057200 . jpa-00235709

**HAL Id: jpa-00235709**

**<https://hal.science/jpa-00235709>**

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.

## RÉSISTANCES ET CAPACITÉ INTERNES D'UNE PHOTOPILE AU SÉLÉNIUM AUX BASSES TEMPÉRATURES.

Par G. BLET,

Chef du Laboratoire de Photométrie du C. R. S. I. M.

### I. Détermination de la capacité d'une photopile.

Plusieurs méthodes se présentent à l'esprit pour mesurer la capacité interne d'une photopile [1]. Nous en avons utilisé deux : *a*) la méthode directe qui consiste à mesurer l'intensité du courant alternatif qui traverse la capacité lorsqu'on lui applique une tension connue ; *b*) une méthode indirecte où la capacité inconnue est connectée aux bornes d'une bobine de self-induction : la mesure de la fréquence propre d'oscillation permet de connaître la valeur de la capacité.

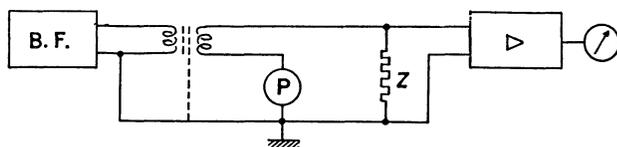


FIG. 1. — Schéma du circuit pour la mesure directe de  $C$ .

**A. MÉTHODE DIRECTE.** — Nous avons réalisé le montage de la figure 1 où une tension alternative d'amplitude et de fréquence  $f$  constante est appliquée au circuit constitué par la photopile  $P$  et une résistance très faible  $Z$  en série. Étant données les nécessités de mise à la masse de ce circuit, la liaison au générateur se fait par l'intermédiaire d'un transformateur blindé spécial, à très faible capacité entre le secondaire d'une part et le primaire ou la masse d'autre part. Un amplificateur suivi d'un appareil de mesure est appliqué aux bornes de la résistance  $Z$ .

Pour que les mesures soient correctes, il est nécessaire que l'impédance de la capacité  $C$  de la photopile  $P$  soit très faible devant sa résistance interne  $R$  et très grande devant  $Z$ .

A la température ambiante :  $C$  est voisin de  $4 \cdot 10^{-9}$  F,  $R$  est voisin de  $3 \cdot 10^6$  ohms. On ne peut choisir  $f$  trop élevé à cause des capacités parasites du montage. En choisissant  $f = 3\ 000$  Hz et  $Z = 10$  ohms, la précision escomptée est supérieure à 1 % et s'améliore aux basses températures. L'ensemble est étalonné par substitution.

**B. MÉTHODE INDIRECTE.** — Nous utilisons cette fois un oscillateur très stable dont le circuit oscillant attaque la grille en dérivation et n'est de ce fait parcouru par aucun courant continu. La liaison à la grille est effectuée par une capacité de très faible

valeur. Une capacité fixe de plus forte valeur et une résistance de charge aux bornes de la self à air diminuent le facteur de surtension du C-O en augmentant sa stabilité et en éliminant l'influence éventuelle de la résistance de fuite de la photopile.

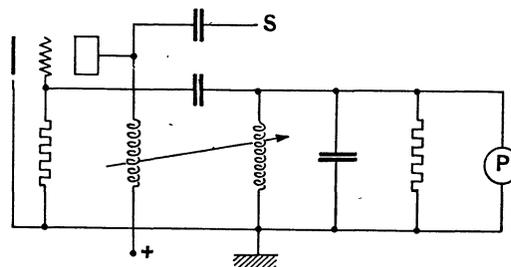


FIG. 2. — Schéma du circuit pour la mesure indirecte de  $C$ .

L'ensemble est conforme au schéma de principe de la figure 2.

Une sortie  $S$  par condensateur sur la plaque attaque un fréquencemètre à lecture directe classique à lampe amplificatrice écrêteuse suivie d'un circuit de charge à double diode au germanium et condensateur avec milliampèremètre en série (voir figure 3).

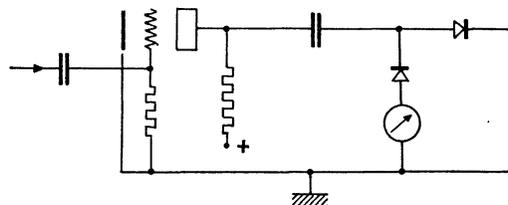


FIG. 3. — Fréquencemètre étalonné directement en  $C$ .

Comme précédemment l'ensemble est étalonné par substitution à la photopile de capacité connues.

Cette méthode semble plus sûre que la méthode directe et présente moins de causes d'erreur accidentelles ou systématiques.

**C. RÉSULTATS DE MESURE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE.** — Les résultats obtenus sont, aux erreurs d'expérience près, identiques avec les deux méthodes, quoique leur reproduction soit meilleure avec la méthode de l'oscillateur.

Les variations de la capacité interne en fonction de la température pour une photopile maintenue à l'obscurité sont représentées par le graphique de la figure 4.

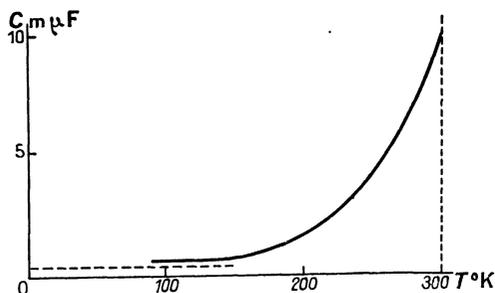


FIG. 4. — Variation de C avec la température absolue.

Le premier examen de cette courbe montre qu'après une décroissance très rapide d'allure exponentielle, la capacité tend vers une valeur limite  $C_0 = 300$  pf. Il vient donc à l'esprit que la capacité mesurée est la somme d'une capacité fixe  $C_0$  et d'une capacité  $C_1$  variable avec la température et tendant vers zéro avec elle. Il devient intéressant de confronter les valeurs de  $LC_1$  avec celles de  $1/T$  pour chercher à voir si la diminution de capacité, lorsque la température diminue, ne serait pas due à l'abandon progressif d'un niveau de conduction par des électrons thermiques.

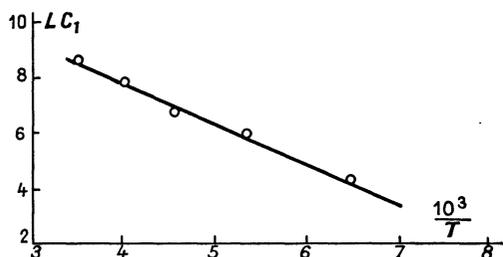


FIG. 5. — Variation de Log  $C_1$  en fonction de  $1/T$ .

La figure 5 montre l'existence d'une relation linéaire entre  $LC_1$  et  $1/T$ , ce qui permet d'écrire :

$$LC_1 = -\Delta E/kT + A \text{ avec } \Delta E = 0,17 \pm 0,02 \text{ eV.}$$

La relation peut se mettre sous la forme :

$$C_1 = \frac{\Gamma}{\exp \Delta E/kT}$$

à rapprocher de

$$n = \frac{N}{1 + \exp \Delta E/kT}$$

représentant le peuplement du niveau d'énergie  $\Delta E$  en fonction de la température  $T$ .

Or dans le domaine des températures étudiées

$T < 300$  °K, l'exponentielle est suffisamment grande pour que l'unité puisse être négligée devant elle. Il semblerait donc que la capacité  $C_1$  soit proportionnelle à la concentration en électrons à un niveau situé à 0,17 eV.

Si l'on utilise une représentation similaire pour la conductance de la photopile (voir l'article précédent [2]), on constate que l'on peut admettre une loi linéaire avec une approximation du même ordre donnant la valeur  $\Delta E = 0,18 \pm 0,02$  eV.

Il semble donc que l'on puisse admettre que capacité et conductance sont dus à la présence d'électrons libres de deux sortes : a) une première catégorie dont la concentration ne serait pratiquement pas influencée par la température ; b) une seconde catégorie dont la concentration varie selon la loi classique

$$n = \frac{N}{1 + \exp \Delta E/kT}$$

en donnant à  $\Delta E$  la valeur

$$\Delta E = 0,175 \pm 0,02 \text{ eV.}$$

On peut alors écrire :

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_1.$$

$$C = C_0 + C_1.$$

La constante de temps  $RC$  de la photopile peut alors se calculer avec

$$1/R = (1/R_0) + (1/R_1) = (R_0 + R_1)/(R_0 R_1)$$

d'où :

$$RC = R_0 R_1 (C_0 + C_1) / (R_0 + R_1).$$

Si la température est élevée :  $R_1 \ll R_0$  et  $C_1 \gg C_0$  d'où :  $RC = R_1 C_1 = C_1/\gamma_1 =$  constante d'après ce que nous venons de voir.



FIG. 6. — Variation de  $RC$  en fonction de  $T$ .

Pour les basses températures :  $R_1 \rightarrow \infty$  et  $C_1 \rightarrow 0$  d'où :

$$RC \rightarrow R_0 C_0.$$

La courbe  $RC = f(T)$  est donc une courbe en S. C'est ce que l'expérience met en évidence (voir la figure 6).

**II. Influence de la resensibilisation.** — Comme dans l'étude des variations de résistance [3], [4], nous allons retrouver ici l'influence d'une bande spectrale centrée sur  $0,75 \mu$ . L'éclairement de la photopile refroidie, par une longueur d'onde de cette bande spectrale provoque la remontée de la

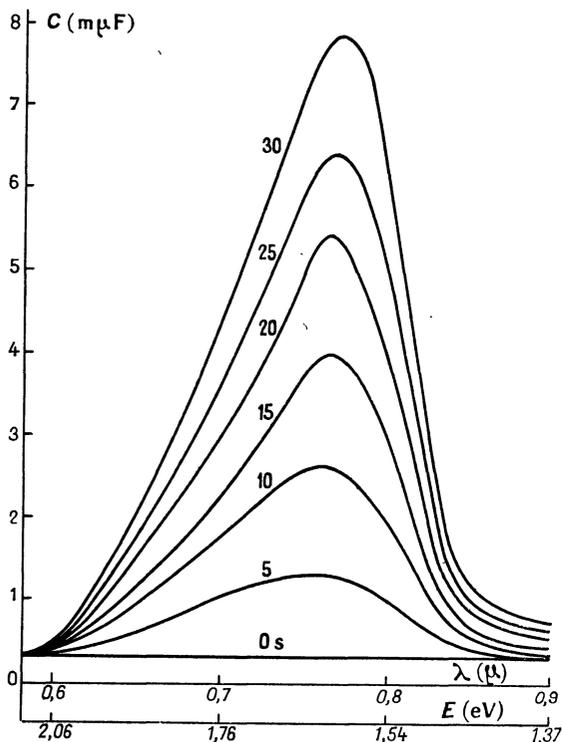


Fig. 7. — Courbes de resensibilisation à  $80 \text{ }^\circ\text{K}$  en fonction de la longueur d'onde, pour diverses durées de 5 en 5 secondes.

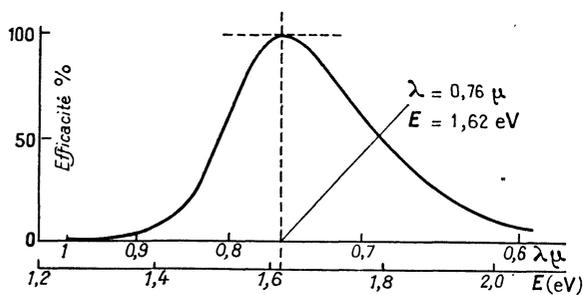


Fig. 8. — Courbe d'efficacité en fonction de l'énergie en électron-volt des photons incidents.

valeur de la capacité comme elle provoquait une diminution de la résistance. On peut étudier le phénomène en mesurant la vitesse de resensibilisation pour différentes longueurs d'onde. On obtient ainsi le réseau de courbes de la figure 7, sur laquelle est portée en abscisse la longueur d'onde de la radiation utilisée et en ordonnée la capacité de la photopile après des temps croissants

d'éclairement avec une intensité énergétique de 2 microwatts.

On constate aisément que l'accroissement de capacité est très sensiblement proportionnel à la durée d'éclairement, autrement dit le nombre d'électrons transférés à un niveau de conduction, tant qu'il est faible, est proportionnel à l'énergie reçue, le coefficient de proportionnalité dépendant de la longueur d'onde.

La courbe d'efficacité est tracée sur la figure 8, en donnant au maximum la valeur unité.

On trouve sur ce graphique que le maximum d'efficacité a lieu pour une énergie des photons incidents de  $1,62 \pm 0,02 \text{ eV}$ , soit pour une longueur d'onde de  $0,76 \mu$  environ.

### III. Réponse à un flux lumineux modulé.

— Pour étudier la réponse de notre photopile à un flux lumineux modulé [5], nous relierons celle-ci à l'entrée d'un amplificateur à courant continu. Son entrée possède une résistance variable qui servira de résistance de charge à la photopile, et la sortie de cet amplificateur est reliée à un oscillographe cathodique. On peut ainsi enregistrer la trace du zéro et la modulation du courant de sortie. Les élongations maxima et minima du spot étant  $M$  et  $m$ , le taux de modulation a pour valeur

$$\tau = (M - m) / (M + m).$$

Un galvanomètre branché en série avec la résistance de charge indique la valeur moyenne

$$(M + m) / 2.$$

La première constatation que l'on fait lorsque la température varie est que pour une résistance de charge donnée et une fréquence donnée, le taux de modulation diminue très vite dès que la température diminue. Sous une autre forme, on peut dire que l'abaissement de la température produit une diminution de la composante continue et de la

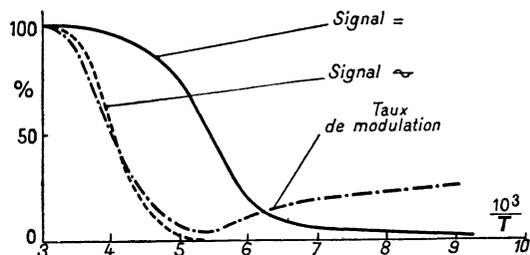


Fig. 9. — Variations de la composante continue, de la composante alternative et du taux de modulation en fonction de  $1/T$ .

composante modulée du courant photoélectrique, mais la composante modulée diminue plus rapidement que la composante continue : c'est ce que montre la figure 9 relative à la fréquence 333 Hz et à une résistance de charge de 3 000 ohms.

Ce résultat : diminution rapide du taux de modulation lorsque la température baisse, confronté avec la diminution rapide de la capacité dans les mêmes conditions, est en contradiction formelle avec la théorie classique des photopiles. D'après celle-ci en effet, la baisse de sensibilité en lumière modulée constatée lorsque la fréquence croît était imputée à la présence de la capacité interne en shunt aux bornes du générateur. Cette explication, valable à la température ambiante, ferait prévoir aux basses températures des phénomènes radicalement opposés à ceux que l'on constate. Nous devons donc faire intervenir d'autres phénomènes plus complexes.

Le schéma classique de la photopile est représenté sur la figure 10.

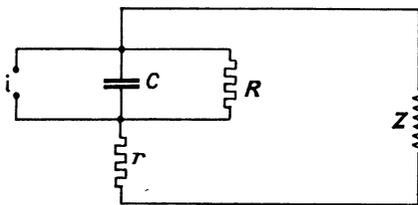


FIG. 10. — Schéma équivalent classique de la photopile.

Le générateur est une source d'électrons dont le débit est proportionnel à l'éclairement. Pour une modulation sinusoïdale de la lumière :  $i = i_0 (1 + \sin \omega t)$ ,  $R$  est la résistance interne,  $r$  la résistance de conduction et  $Z$  la résistance de charge.

Posons :

$$1/\rho = (1/R) + (1/r + Z).$$

La mise en équation est très simple, la résolution l'est également et l'on trouve pour  $v$ , différence de potentiel aux bornes du condensateur :

$$v = \frac{\rho \cdot i_0}{\sqrt{1 + C^2 \rho^2 \omega^2}} (\sin \omega t + \varphi) + \rho i_0$$

avec

$$\operatorname{tg} \varphi = - C \rho \omega.$$

La différence de potentiel aux bornes de la résistance de charge  $Z$  vaut  $v Z / (r + Z)$ .

Le taux de modulation est égal à :

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{1 + C^2 \rho^2 \omega^2}}.$$

Si  $C \rho \omega$  est petit devant l'unité, le taux de modulation est de 100 %. C'est le cas en particulier pour les résistances de charge très faibles. Ainsi pour une cellule de 10 mm de diamètre dont les constantes sont :  $C = 10^{-8}$  F,  $R = 10^6 \Omega$ ,  $r = 50 \Omega$ , une résistance de charge de 100  $\Omega$  assure un taux de modulation supérieur à 99 % pour toute fréquence inférieure à 20 000.

La figure 11 montre les variations de  $\tau$  avec  $Z$  pour diverses fréquences.

L'accord avec la théorie n'est que qualitatif et ceci est bien compréhensible car nous avons raisonné avec des valeurs de  $C$  et  $R$  bien déterminées, alors que ces grandeurs varient avec l'éclairement. Toutefois les variations de  $\tau$  avec  $Z$  et avec  $F$  sont bien dans le sens prévu par cette théorie simplifiée, les courbes ayant une asymptote horizontale  $\tau_\infty = \frac{1}{\sqrt{1 + C^2 R^2 \omega^2}}$  pour  $Z \rightarrow \infty$ .

Par contre aux températures inférieures à la

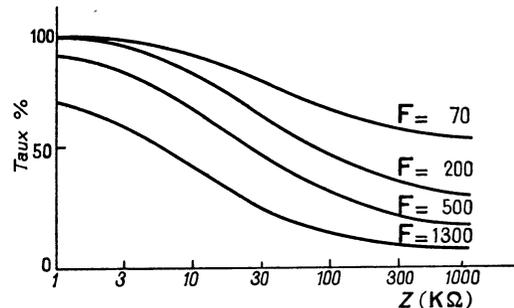


FIG. 11. — Variations à la température ambiante du taux de modulation en fonction de la fréquence et de la résistance de charge.

température ambiante, vers 225 °K par exemple,  $R$  et  $C$  ont varié considérablement tous les deux tout en maintenant  $RC$  pratiquement constant, alors que le courant moyen reste inchangé et que le taux de modulation tombe de 100 % à 25 % pour la fréquence 333 Hz.

Il est certain que la mobilité des électrons doit intervenir et il y a peut-être là un moyen d'étudier ses variations avec la température.

L'évolution simultanée de  $R$  et de  $C$  au cours des variations de température peut se mettre en évidence d'une manière très simple en appliquant à la photopile une tension alternative sinusoïdale de fréquence convenable et en faisant sur l'écran d'un oscillographe cathodique le Lissajous courant-tension. La forme de la courbe renseigne à la fois sur le module de l'impédance  $Z$  et sur l'angle de phase  $\varphi$ . Un film pris au cours de la resensibilisation (quelques minutes avec 2 microwatts de longueur d'onde 0,75  $\mu$ ) montre de façon saisissante l'évolution de  $|Z|$  et de  $\Phi$ . Les photographies de la planche I ont été extraites de ce film, de 10 secondes en 10 secondes. La fréquence était de 60 000 Hz et la tension appliquée voisine de 2 volts.

Sur cette succession de photographies on constate très aisément les deux phénomènes survenant au cours de la resensibilisation : 1° l'augmentation de l'amplitude verticale indique une diminution d'impédance ; 2° la rotation de l'ellipse indique une diminution du déphasage.

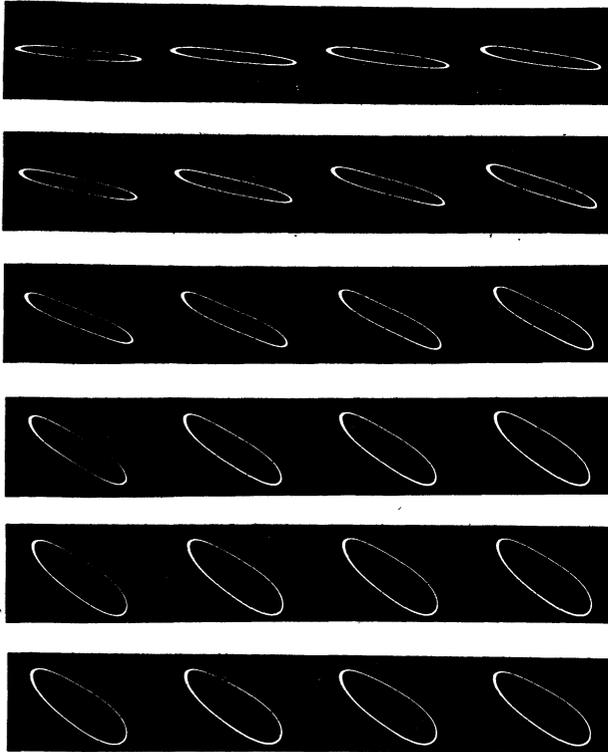


PLANCHE I. — Aspects de 10 secondes en 10 secondes de la courbe de Lissajous tension courant pour une photopile refroidie à 80 °K, au cours de la resensibilisation par un flux de 2 microwatts de longueur d'onde 0,75  $\mu$ .

Ces deux résultats sont en parfait accord avec les formules établies ci-dessus, pour les variations de  $R$  et de  $C$ .

**IV. Variations concomitantes de  $R$  et de  $C$  en fonction de l'éclairement.** — Nous avons déjà signalé il y a quelques années [1], [6] que les variations de résistance interne provoquées par un éclairement étaient accompagnées de variations de la capacité. Nous avons repris cette étude longueur d'onde par longueur d'onde en étudiant simultanément la dynamique de ces variations.

**A. CAPACITÉ.** — Nous pouvons enregistrer les variations de capacité au moyen du dispositif à oscillateur et fréquencemètre décrit ci-dessus. Une courbe typique obtenue est représentée sur la figure 12.

Cette courbe peut être divisée en quatre tronçons :

$ab$  — à l'instant  $t_0$ , la cellule est éclairée et la capacité varie presque instantanément de la valeur  $C_0$  à la valeur  $C_1 > C_0$ .

$bc$  — à partir de cette valeur  $C_1$  la capacité continue à croître lentement d'une façon pseudo-exponentielle jusqu'à une limite  $C_2$ .

$cd$  — à l'instant  $t_1$ , l'éclairement est supprimé et la capacité redécroit presque instantanément jusqu'à la valeur  $C_3$ .

$de$  — à partir de cette valeur la décroissance de la capacité se poursuit lentement de façon pseudo-exponentielle jusqu'à la valeur initiale  $C_0$ .

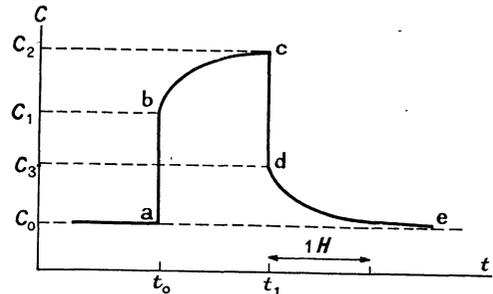


FIG. 12. — Variations de la capacité avec l'éclairement, en court-circuit.

Dans la mesure à l'oscillateur, la cellule est reliée à une bobine de self-induction, donc pratiquement (180  $\Omega$ ) en court-circuit ohmique. Il est possible toutefois de laisser la cellule en circuit ouvert en la reliant par l'intermédiaire d'un condensateur de forte capacité (1  $\mu$ F, par exemple). La mesure n'est pas modifiée, à 1 % près, mais la courbe de récupération est très différente, la partie rectiligne du début étant supprimée, ainsi que le montre l'enregistrement de la figure 13.

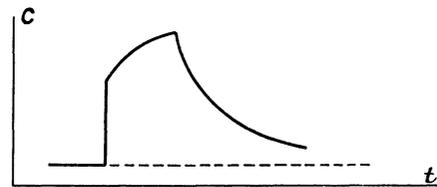


FIG. 13. — Variations de la capacité avec l'éclairement, en circuit ouvert.

On peut reprendre le tracé de la courbe type de la figure 12 en supprimant l'éclairement dès que le spot a atteint le point  $b$ . Dans ce cas la décroissance  $cd$  est instantanée et la portion exponentielle de la courbe  $de$  se réduit à très peu de chose.

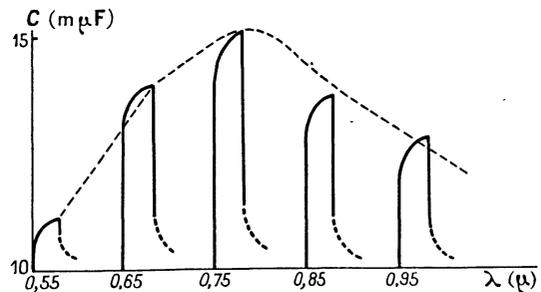


FIG. 14. — Variation de  $C$  avec l'éclairement pour diverses longueurs d'onde.

Ceci nous amène à envisager une dualité dans les phénomènes, deux au moins devant être mis en cause, avec des constantes de temps très différentes.

Si nous enregistrons cette courbe pour diverses valeurs de la longueur d'onde, mais avec des énergies identiques, nous obtenons l'ensemble de la figure 14, où la ligne en tirets joignant les sommets donne la courbe d'efficacité des diverses longueurs d'onde au point de vue de leur action sur la capacité. Ces courbes ont été obtenues avec une puissance de 2 microwatts.

Nous retrouvons une fois de plus la courbe de distribution avec maximum vers  $0,75 \mu$ .

**B. RÉSISTANCE.** — Nous avons déterminé d'une manière identique les variations de résistance consécutives à un éclairage de 3 minutes avec 2 microwatts pour chaque longueur d'onde. Les courbes de récupération, fort semblables à celles relatives à la capacité, ne comportent toutefois pas la branche verticale à variation quasi instantanée, et la récupération semble plus rapide.

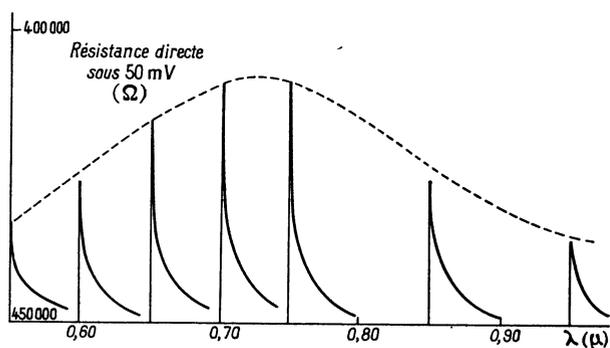


FIG. 15. — Variations de la résistance directe avec l'éclairage pour diverses longueurs d'onde.

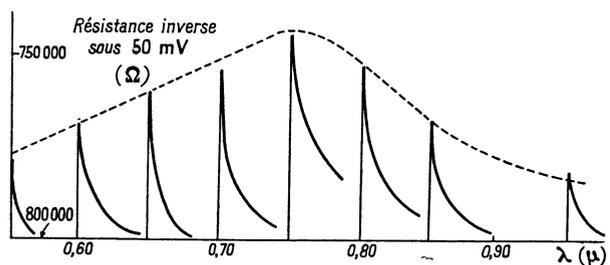


FIG. 16. — Variations de la résistance inverse avec l'éclairage pour diverses longueurs d'onde.

Les figures 15 et 16 sont relatives respectivement à la résistance directe et à la résistance inverse, mesurées toutes deux sous 50 millivolts.

**V. Variations de C avec la polarisation.** — L'application d'une tension de polarisation à la photopile modifie sa résistance interne ainsi que cela est connu (nous en avons publié une étude

détaillée) et modifie également sa capacité interne. L'étude de ce phénomène peut se faire aisément avec le montage de l'oscillateur en mettant en série dans le circuit de la cellule une résistance très faible ( $10 \Omega$ ) parcourue par un courant convenable pour créer la polarisation cherchée.

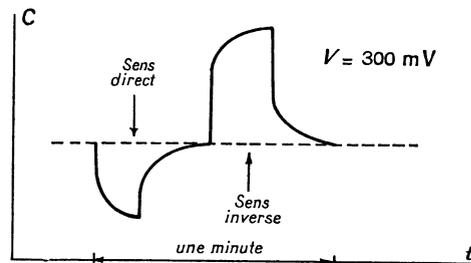


FIG. 17. — Variations de la capacité avec une tension de polarisation.

L'enregistrement de la figure 17 reproduit les variations de capacité observées lorsqu'on applique une tension de 300 millivolts soit dans le sens direct, soit dans le sens indirect.

Les courbes ressemblent beaucoup à celles obtenues par éclairage. Il convient toutefois de remarquer que l'échelle des temps est dilatée par un coefficient 60 : les constantes de temps des deux phénomènes sont donc très différentes. Sur les enregistrements originaux nous les avons estimées respectivement à : 40 à 50 minutes dans le cas de l'éclairage ; 4 à 5 secondes dans le cas de la polarisation.

... soit 600 fois moins environ.

**VI. Résumé des résultats obtenus.** — **A.** — A la température ambiante ( $300 \text{ }^\circ\text{K}$ ) une photopile possède à l'obscurité et à l'état de repos une résistance interne  $R$  et une capacité interne  $C$  définies.

Toute cause agissant sur l'une de ces grandeurs agit en sens inverse sur l'autre et en général de telle sorte que  $RC$  reste constant :

a) les variations provoquées par l'application d'une tension de polarisation sont à constante de temps faible : 4 à 5 secondes ;

b) les variations causées par l'éclairage sont à constante de temps élevée : 40 à 50 minutes, et dépendent de la longueur d'onde de la lumière excitatrice. A puissance reçue égale, la longueur d'onde  $0,76 \mu$  est la plus active.

**B.** — Le refroidissement de la cellule et sa réactivation par des longueurs d'onde voisines de  $0,76 \mu$  produisent sur  $R$  et  $C$  des variations de sens contraire.

**C.** — Le refroidissement de la cellule produit une diminution rapide du taux de modulation du signal électrique correspondant à un éclairage modulé.

Le tableau ci-dessous rassemble ces résultats.

	$R$	$C$	CONSTANTE DE TEMPS	TAUX DE MODULATION
Courant positif . . . . .	↗	↘	4 à 5 secondes	—
Courant négatif . . . . .	↘	↗	4 à 5 secondes	—
Éclairement . . . . .	↘	↗	40 à 50 minutes	—
Refroidissement . . . . .	↘	↘		↘
Resensibilisation . . . . .	↘	↗		↗

Rappelons que le courant est dit positif s'il circule dans le même sens que le courant photoélectrique, et négatif dans le cas contraire.

Manuscrit reçu le 9 juillet 1957.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- |   |   |
|---|---|
| [1] BLET (G.), Variations de la résistance et de la capacité d'une photopile. <i>J. Physique Rad.</i> , 1953, <b>14</b> , 34-35 S.  | [5] BLET (G.), Inertie et capacité dans les photopiles <i>J. Physique Rad.</i> , 1957, <b>17</b> , 60-62 S.   |
| [2] BLET (G.), Résistances et capacité internes d'une photopile au sélénium aux basses températures. <i>J. Physique Rad.</i> , 1957, <b>18</b> , 297-303.                       | [6] BLET (G.), Un nouveau type de fatigue des photopiles. <i>C. R. Acad. Sc.</i> , 1954, <b>238</b> , 228-230.  |
| [3] BLET (G.), De l'influence du proche infra-rouge aux basses températures sur les propriétés des photopiles au sélénium. <i>C. R. Acad. Sc.</i> , 1956, <b>243</b> , 798-800. | [7] BLET (G.), Déterminations photoélectriques des énergies d'activation dans une photopile au sélénium. <i>Société française de Physique</i> . Section Méditerranée, 29 juin 1956. |
| [4] BLET (G.), La resensibilisation aux basses températures des photopiles au sélénium par l'action du proche infra-rouge. <i>J. Physique Rad.</i> , 1957, <b>18</b> , 121-127. |   |