

**Zeitschrift:** Helvetica Physica Acta  
**Band:** 24 (1951)  
**Heft:** IV  
  
**Artikel:** Variation de la résistivité des lames minces métalliques en fonction de l'épaisseur et de la température  
**Autor:** Borel, J.P.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-112223>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 21.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Variation de la résistivité des lames minces métalliques en fonction de l'épaisseur et de la température

par J. P. Borel, E. P. U. L. (Lausanne).

(27. VI. 51.)

*Sommaire.* Une étude des propriétés électriques des lames minces d'argent a été faite pour différentes épaisseurs et à différentes températures. On constate que les lames dont l'épaisseur est inférieure à 10 millimicrons ont toutes le même comportement lorsque la température augmente (augmentation irréversible de résistance). Les couches dont l'épaisseur est voisine de 12 millimicrons ont au contraire des variations réversibles de résistance en fonction de la température.

On a de plus relevé le diagramme d'évolution ainsi que le diagramme tension-courant de différentes lames d'épaisseurs comprises entre 2,5 et 20 millimicrons.

## Introduction.

L'étude des lames minces métalliques a pris un grand essor au cours de ces dernières années. Un certain nombre de physiciens ont entrepris des recherches expérimentales et théoriques qui établissent que les couches minces peuvent exister dans trois états distincts:

- 1° L'état compact (C),
- 2° L'état poreux (P),
- 3° L'état granuleux (G).

Au point de vue de la structure une lame G est constituée par des îlots métalliques séparés les uns des autres, tandis que les éléments métalliques d'une lame P se rejoignent et forment des pores. La stabilité de ces différentes structures dépend essentiellement de l'épaisseur, de la température et de la nature du support. L'étude théorique de l'équilibre des états non compacts nécessite un calcul de l'énergie libre (donc aussi de l'entropie) caractérisant les structures lacunaires.

Il va sans dire que chacune des formes C, P et G se caractérise par des propriétés physiques particulières. L'objet du présent article est de donner un aperçu des mesures de résistivité électrique qui ont été faites au laboratoire de physique de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne.

### Technique expérimentale.

Les dépôts se faisaient en évaporant sous vide de l'argent chauffé sur un ruban de molybdène parcouru par un courant de 20 à 50 A. Le molybdène ayant une tension de vapeur très basse (environ  $10^{-8}$  mm Hg à  $1500^{\circ}\text{C}$ ) ne produit pas de dépôt parasite venant perturber les mesures. Le vide de  $10^{-5}$  mm Hg était obtenu par une pompe à diffusion d'huile à grand débit.

La mesure de l'épaisseur s'effectuait par pesée d'un verre témoin. Lorsqu'on travaille toujours dans les mêmes conditions (même pression, mêmes dimensions géométriques) elle est sensiblement proportionnelle à la masse d'argent évaporé. Cela permet d'évaluer avec une précision satisfaisante des dépôts pratiquement impondérables. La résistance électrique des lames minces se mesurait de la manière suivante: Sur une plaque de quartz amorphe on dépose

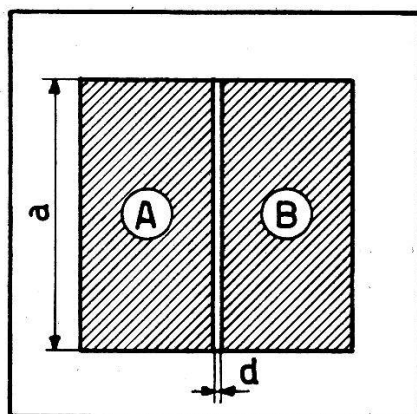


Fig. 1.

deux plages d'argent A et B séparées par un espace libre  $d$  (figure 1). Ces deux plages constituent les électrodes entre lesquelles on déposera la lame mince que l'on désire étudier. L'épaisseur de ces électrodes est évidemment telle que la chute de tension qu'elles produisent est petite par rapport à la chute de tension dans l'espace „ $d$ “.

Un thermocouple cuivre-constantan est soudé à l'étain sur l'une des deux plages A ou B, à quelques millimètres de la fente. Ce thermocouple relié à un pyromètre régulateur commande, au moyen d'un corps de chauffe en nickel-chrome, la température de la lame d'argent. Ce dispositif permet des mesures de résistance pendant l'évaporation et après celle-ci sous une pression pouvant varier à volonté de  $10^{-5}$  mm Hg à 720 mm Hg et à une température quelconque comprise entre  $15^{\circ}\text{C}$  et  $150^{\circ}\text{C}$ .

**Remarque.**

L'épaisseur mesurée par pesée est celle qu'aurait la lame si elle était dans son état compact. On l'appelle quelquefois « épaisseur équivalente » ( $e_0$ ). Nous calculerons la résistivité à partir de  $e_0$ .

**Effet des structures lacunaires sur les propriétés électriques.****1° L'état granuleux.**

*Diagramme tension courant.* Un conducteur constitué par une juxtaposition d'éléments métalliques séparés les uns des autres n'a aucune raison d'obéir à la loi d'Ohm. Le mécanisme de conduction est assez complexe. Il s'agit probablement d'un effet antélectronique compliqué par la présence d'un film de gaz adsorbé à la surface des granules métalliques.

Le diagramme tension-courant est incurvé, la résistance étant d'autant plus petite que la tension est plus forte.

Voir figures 2a, 2b, 2c.

*Diagramme d'évolution.* Nous appelons diagramme d'évolution la courbe représentant la conduction en fonction du temps compté après la fin de l'évaporation. Trois phénomènes sont à considérer dans l'évolution d'une lame :

1° La cristallisation du métal.

2° Les modifications de structure qui peuvent se produire après le dépôt.

3° L'adsorption gazeuse.

1° Dans le cas d'une lame à structure en grains, la cristallisation du métal peut influencer la courbe d'évolution en modifiant la résistance électrique de chaque granule. Une étude faite sur les couches compactes montre que la cristallisation se fait rapidement, la résistance très grande après l'évaporation passe en quelques minutes à une valeur voisine de sa valeur limite. Dans ces conditions il est évident que la cristallisation ne peut avoir d'influence qu'au tout début de l'évolution des couches G.

2° Le second phénomène pouvant influencer la courbe d'évolution est une modification de structure.

Il est probable en effet qu'après évaporation la couche formée n'aie pas sa structure définitive. Elle doit alors se modifier par la suite, pour atteindre un état d'équilibre. Une telle transformation peut durer plusieurs heures.

3° Après évaporation d'une lame du type G il y a adsorption à la surface du métal d'un film de gaz. La vitesse de formation de ce film est d'autant plus grande que la pression est plus forte.

La figure 2 représente l'évolution d'une lame d'argent, sous une pression de  $10^{-5}$  mm Hg tout d'abord puis sous une pression de  $10^{-2}$  mm Hg. On remarque que le changement de pression provoque une brusque augmentation de vitesse d'évolution.

La stabilisation correspond à la fin du processus d'adsorption. Elle a lieu après plusieurs jours lorsque la pression est basse ( $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  mm Hg). Dès lors toute variation de pression modifie le film adsorbé et produit ainsi une variation réversible de résistance.

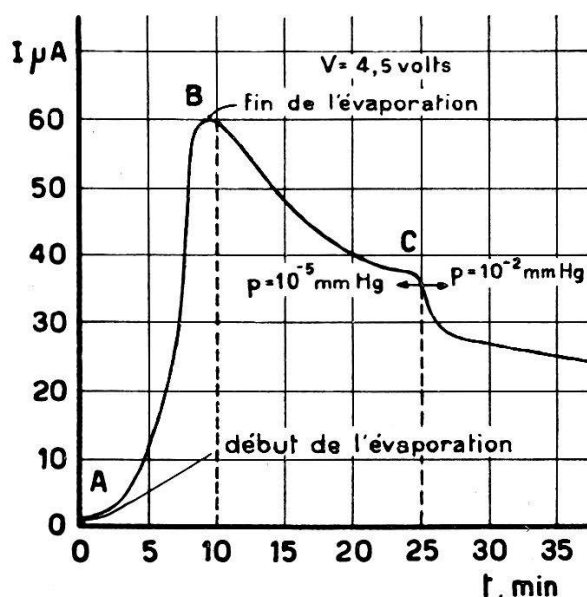


Fig. 2.

Il est évidemment difficile de déterminer exactement l'influence de chacun des phénomènes que nous venons d'énumérer sur le diagramme d'évolution. Cependant il apparaît clairement que l'adsorption joue un rôle prédominant. Pour préciser nos connaissances sur ce point particulier nous pensons faire des mesures d'évolution en modifiant non seulement la pression mais encore la nature du gaz. (Par exemple en utilisant l'argon ou l'hélium.)

Voir figures 1 a, 1 b, 1 c.

*Effet de la température.* Une lame G constituée par des éléments séparés les uns des autres ne doit pouvoir évoluer, lorsque la température varie, que dans le sens d'une division de ces éléments en éléments plus petits et plus nombreux. Le regroupement des grains étant difficile il en résulte des variations de résistivité irréversibles en fonction de la température. Les figures 3b, 3c, 3d montrent l'allure des courbes irréversibles  $\frac{1}{R} = F(T)$  pour des lames d'épaisseurs différentes.

## 2° Les structures poreuses.

Les lames à structure poreuse se distinguent des précédentes par le fait qu'il y a contact entre les différents éléments métalliques. Il en résulte :

1° Que la loi d'Ohm est satisfaite.

2° Que l'adsorption gazeuse a moins d'importance sur le diagramme d'évolution que pour les couches *G*. L'évolution est en effet caractérisée par un  $dR/dt$  positif plus petit que celui des couches *G* (déposées dans les mêmes conditions) ou un  $dR/dt$  négatif (effet de la cristallisation et des modifications de structure).

3° Que les variations de résistivité en fonction de la température sont réversibles. La courbe donnant la conduction  $\frac{1}{R}$  en fonction de la température présente un minimum pour les lames les moins épaisses alors qu'elle est constamment croissante pour les autres.

Voir figures 1e, 3e, 1f, 3f.

## 3° Les structures compactes.

Après le dépôt, la lame a une résistance élevée qui diminue rapidement pour atteindre une valeur voisine de celle du métal massif (cristallisation). On constate un léger effet de l'adsorption. Voir figure 1g.

### Résultats d'expériences.

Un grand nombre de mesures ont été faites pour des épaisseurs comprises entre 2,5 et 20 millimicrons. La vitesse d'évaporation variait de quelques minutes à une heure. Certaines lames ont été déposées par étapes séparées de quelques heures.

La figure 3 résume l'ensemble de ces mesures.

En général les résistivités se trouvent sur la courbe II, aussi bien pour les dépôts rapides ou les dépôts lents que pour les dépôts réalisés par étapes. Quelques mesures «dissidentes» fournissent les courbes I et III. Les lames de la courbe III sont stables et ont un comportement caractéristique des structures en grains. Les lames de la courbe I se distinguent par le fait qu'elles sont instables vis-à-vis des variations de température. En effet, lorsque la température augmente la résistance croît tout d'abord irréversiblement à la manière d'une couche *G*. Lorsqu'on atteint une température critique la résistance diminue subitement pour atteindre après plusieurs jours une valeur limite située sur la courbe II (voir figure 3e). Cette dernière apparaît donc comme la courbe normale de résistivité en fonction de l'épaisseur équivalente. La limite entre les structures

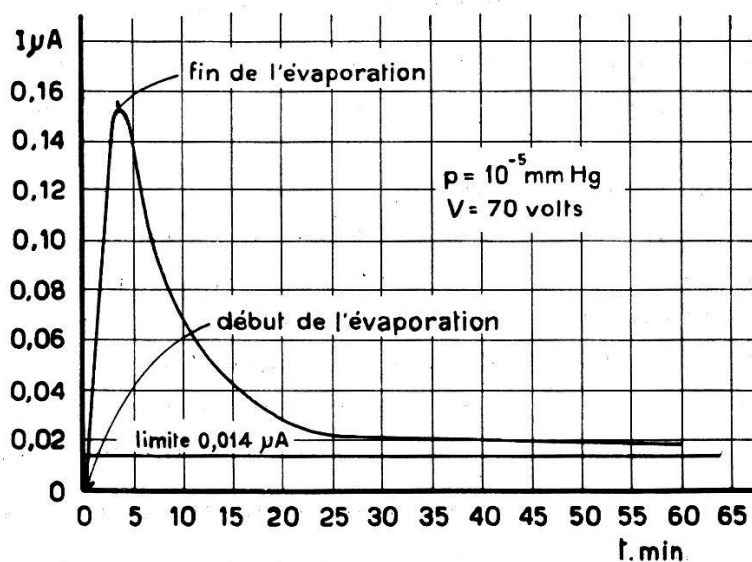


Fig. 1 a.

Evolution. Couche 2,5 millimicrons.

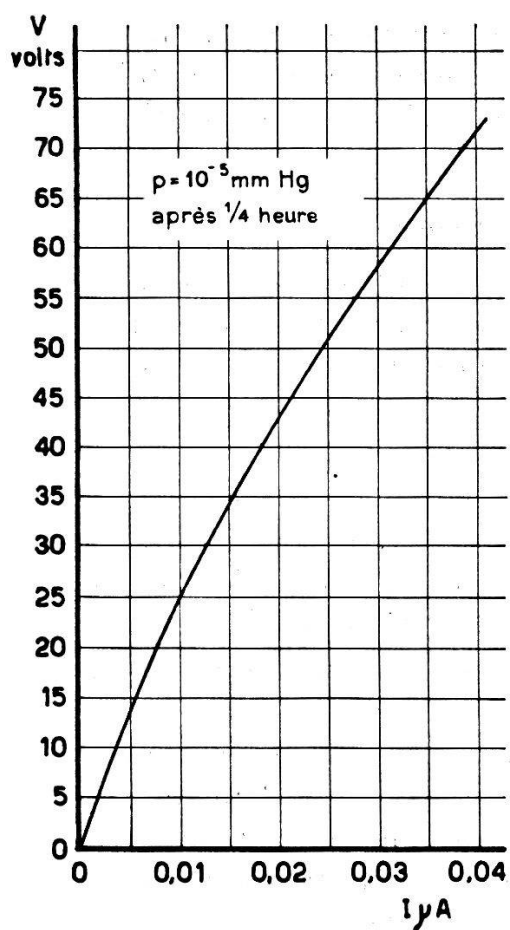


Fig. 2 a.

Couche 2,5 millimicrons.

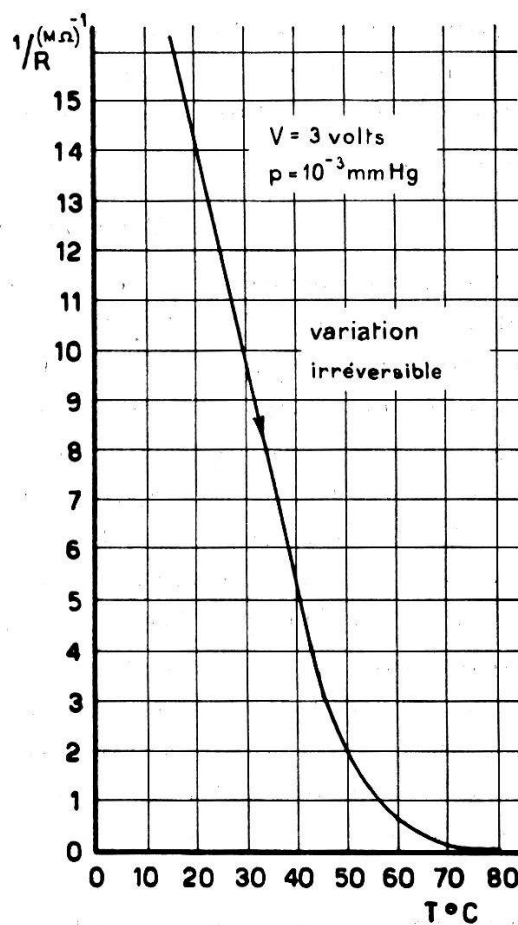
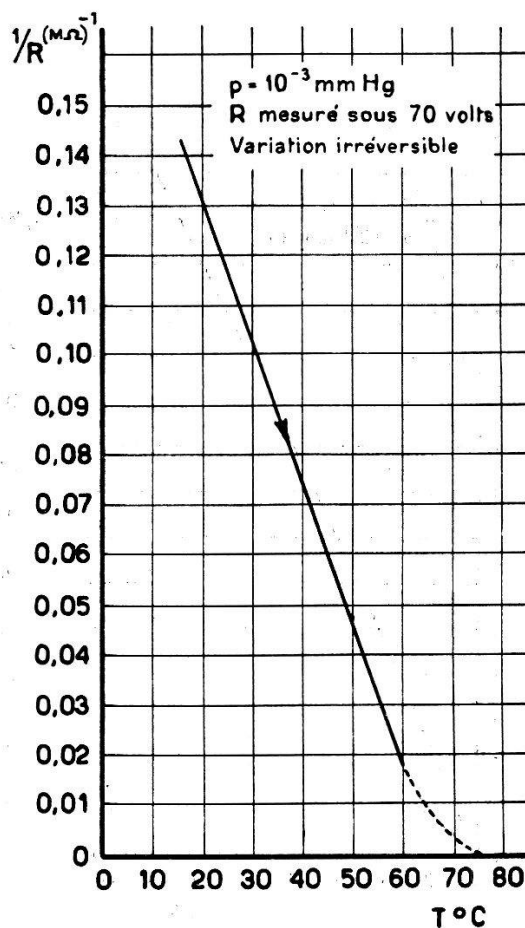
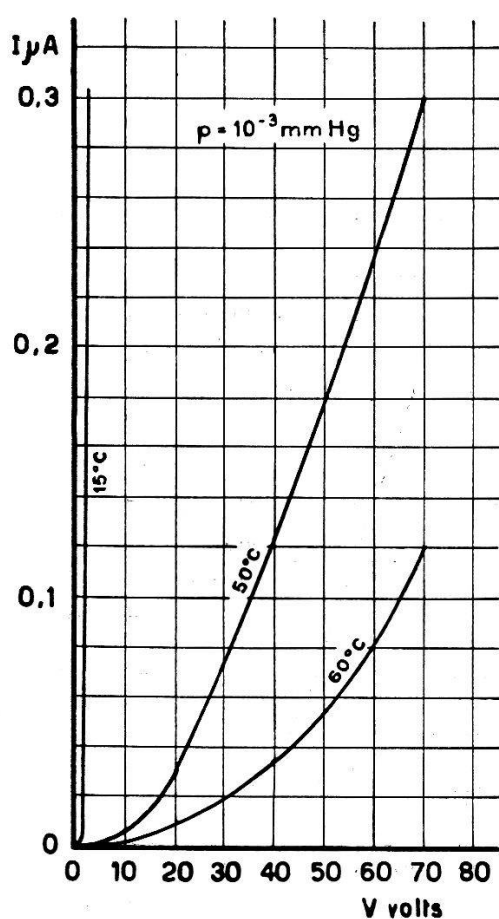
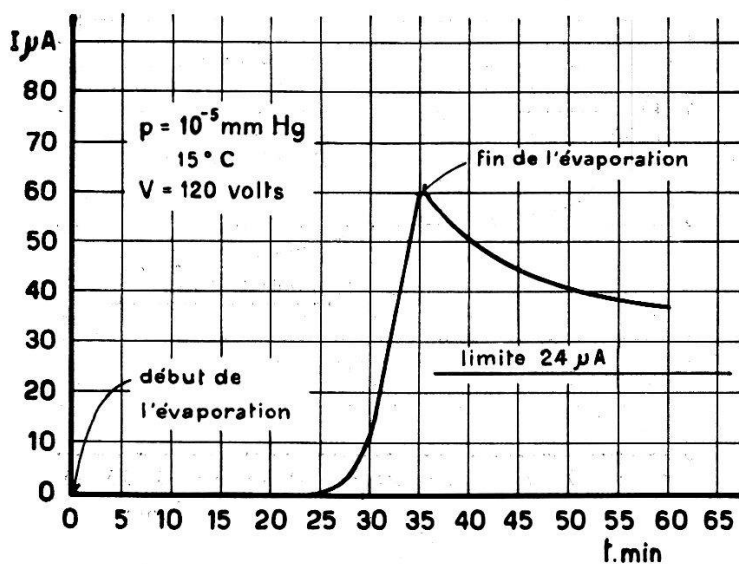


Fig. 3 d.

Couche 9,5 millimicrons.







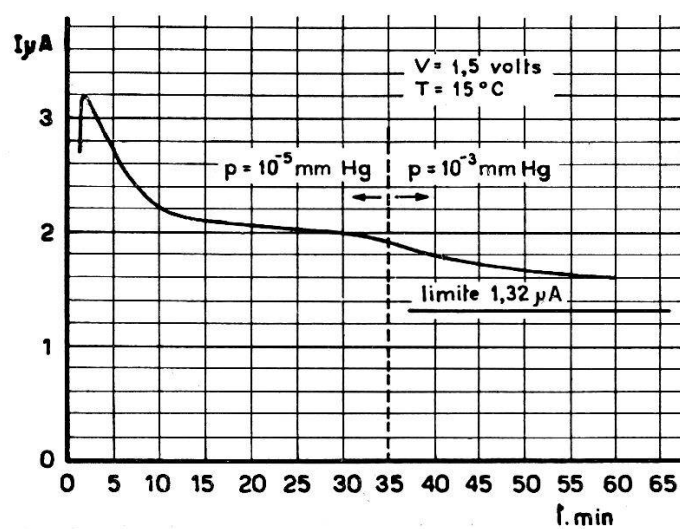


Fig. 1c.

Evolution. Couche 7 millimicrons.

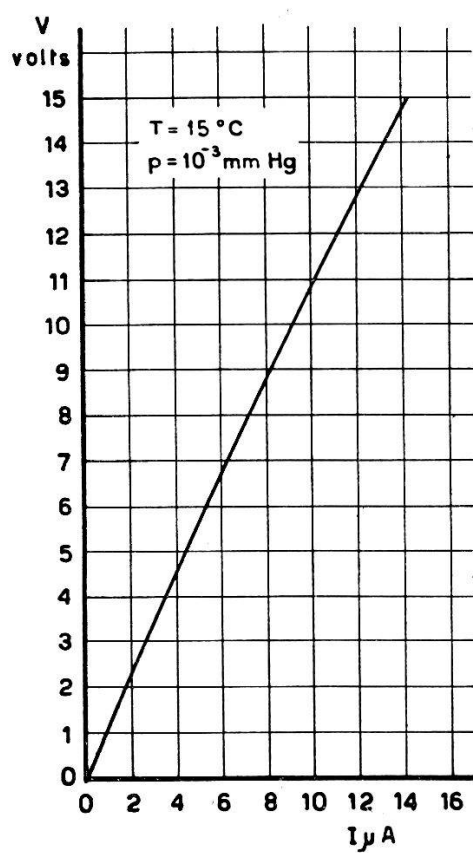


Fig. 2c.

Couche 7 millimicrons.

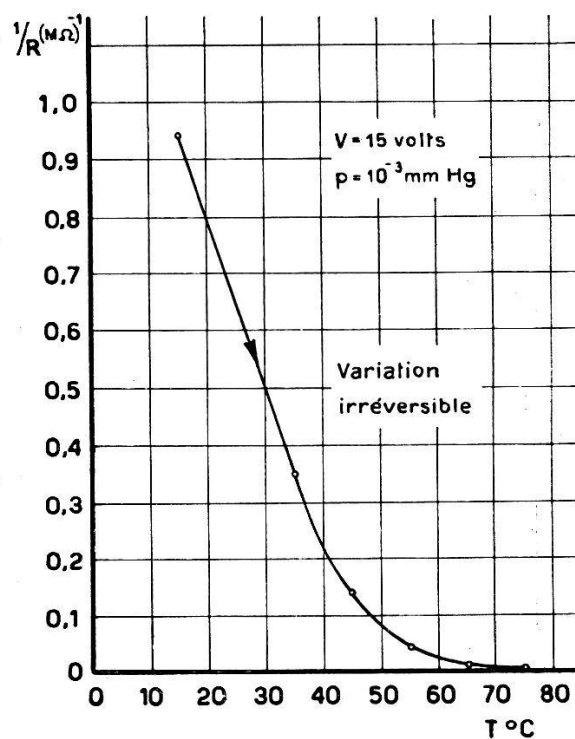


Fig. 3c.

Couche 7 millimicrons.

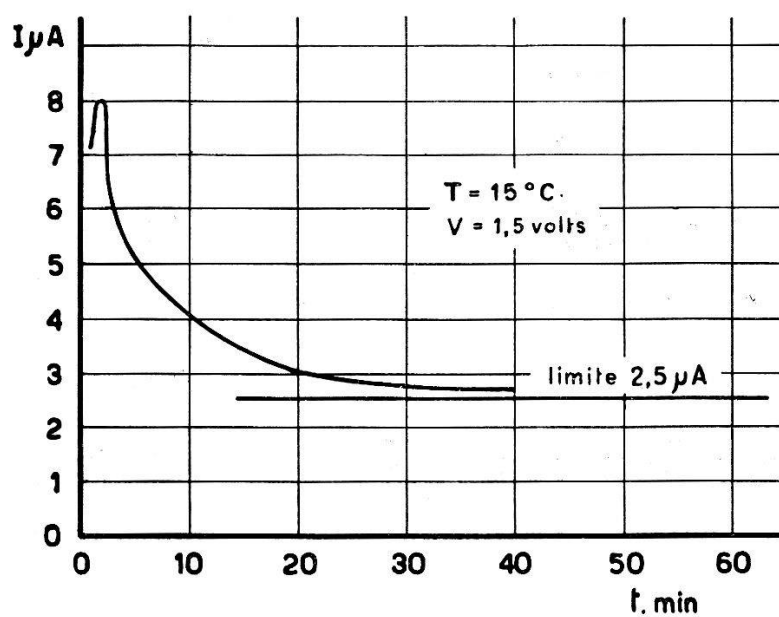


Fig. 1e.

Evolution. Couche 11 millimicrons.

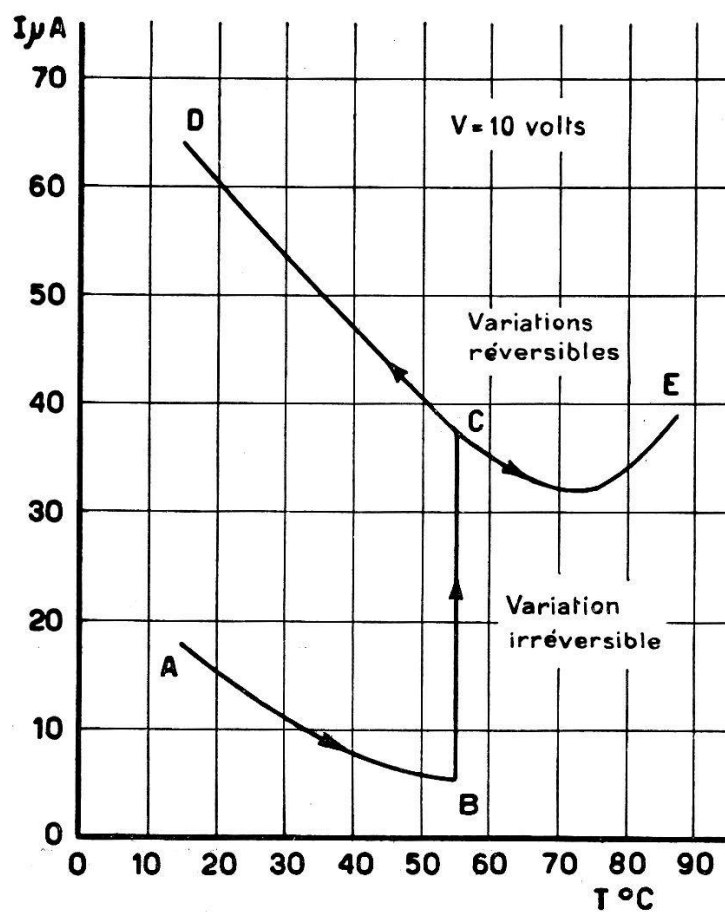
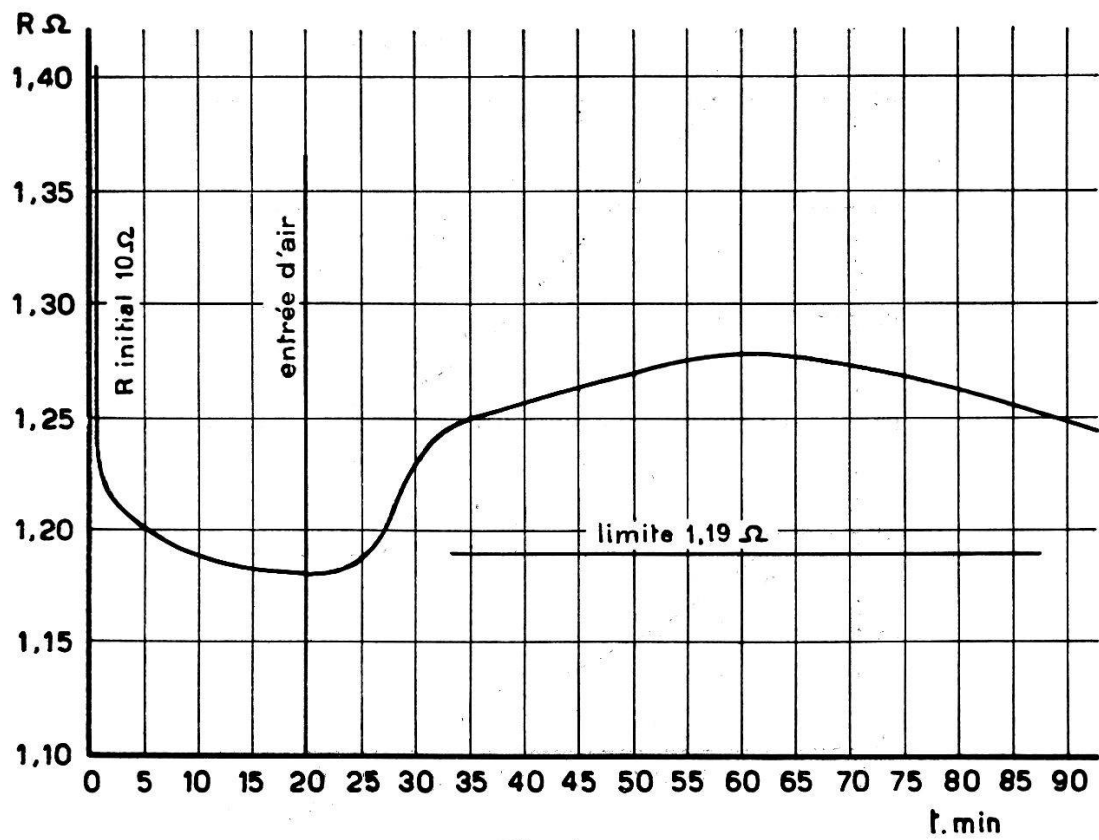
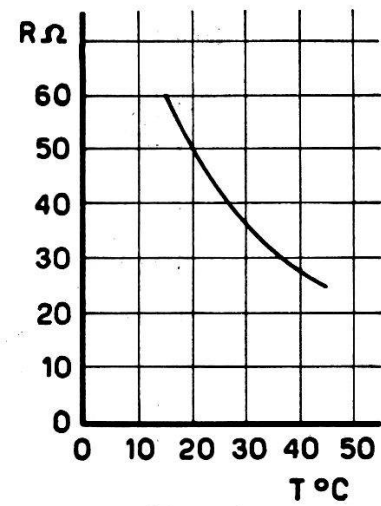
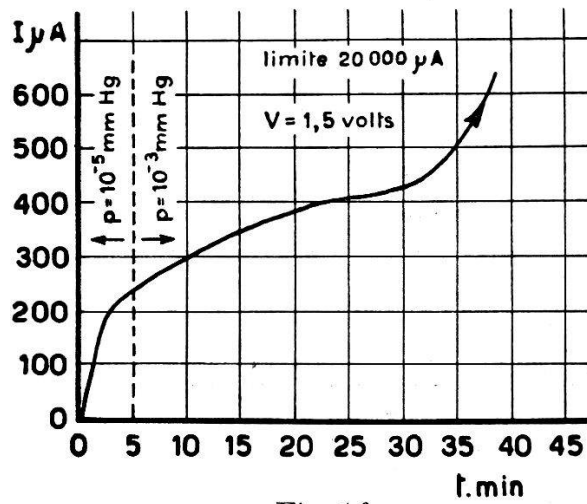


Fig. 3e.

Couche 11 millimicrons.



$P$  et  $G$  est difficile à fixer, les propriétés des lames frontières étant mal caractérisées. La séparation doit se trouver entre 9,5 et 11 millimicrons. De même la limite supérieure des lames poreuses doit se trouver au voisinage de 20 millimicrons.

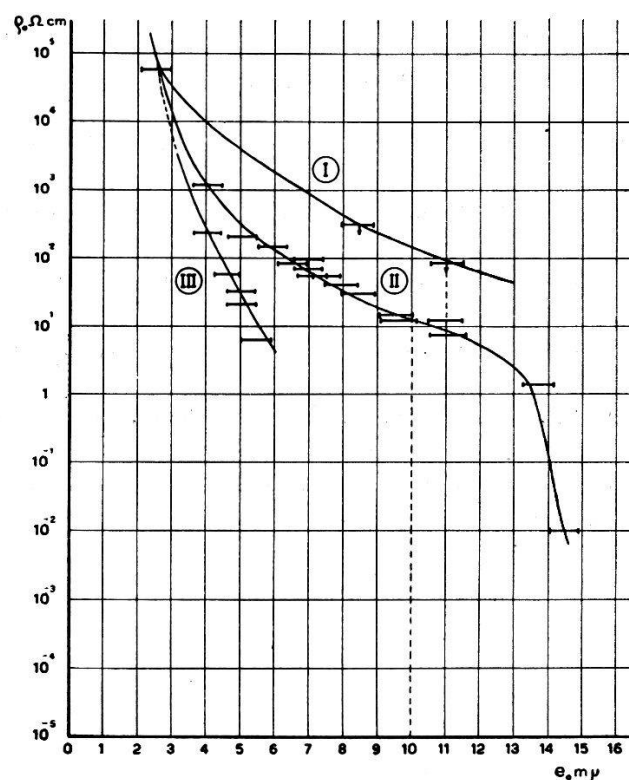


Fig. 3.

Résistivité en fonction de l'épaisseur équivalente mesures faites avec  $I = 1 \mu A$ .

Tableau des figures.

N°	épaisseur évaluée en millimicrons	structure probable	temps d'évaporation en minutes
1a, 2a	2,5	G	3
1b,	4	G	35
2b, 3b	4	G	5
1c, 2c, 3c	7	G	1
3d	9,5	G	2
1e, 3e	11	P	2
1f, 3f	14,5	P	4
1g	20	C	1

Pour toutes les couches, sauf celle de 20 millimicrons, on a :  $a = 2,5 \text{ cm}$ ,  $d = 0,02 \text{ cm}$ . Pour la lame de 20 millimicrons :  $a = 3 \text{ cm}$ ,  $d = 2,5 \text{ cm}$ .

Il serait intéressant d'étudier au microscope électronique les variations de structure des lames métalliques en fonction de la température. Cela permettrait d'interpréter plus exactement les phéno-

mènes électriques qui viennent d'être décrits. Il serait de même intéressant de confronter les résultats d'expériences avec des calculs théoriques. Cela nécessitera une évaluation de l'énergie libre des structures lacunaires et la recherche de ses extrema.

### Bibliographie.

M. PERROT et Melle S. ARCAIX, C. r. Acad. Sci. T 229, 28 novembre 1949, pages 1139—1142.

A. BLANC-LAPIERRE et M. PERROT, C. R. Acad. Sci. T 230, 8 mai 1950, pages 1641—1643.

A. BLANC-LAPIERRE et M. PERROT, C. R. Acad. Sci. T 230, 15 mai 1950, pages 1749—1751.

A. BLANC-LAPIERRE et M. PERROT, Il. Phys. et le radium, T 11, octobre 1950, pages 563—569.

N. CABRERA et J. TERRIEN, Revue d'optique, T 28, N° 11 1949, pages 635 à 643.

R. S. SENETT et G. D. SCOTT, Il. of the optical society of America, Vol. 40, N° 4 avril 1950, pages 203—211.

---