Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles

Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève

Band: 21 (1939)

Artikel: Le courant résiduel dans les multiplicateurs d'électrons électrostatiques [suite et fin]

Autor: Rajchman, Jan

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-742204

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: 15.07.2025

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

LE COURANT RÉSIDUEL

DANS LES MULTIPLICATEURS D'ÉLECTRONS ÉLECTROSTATIQUES

PAR

Jan RAJCHMAN

(Avec 28 fig.)

(suite et fin)

---

4. L'ÉMISSION FROIDE.

a) *Introduction.*

Une contribution sérieuse au courant résiduel provient de l'émission des électrodes qui résulte de l'action du champ électrostatique agissant à la surface des électrodes ou d'autres conducteurs présents dans le tube. En général des champs extrêmement intenses tendant à extraire les électrons, sont nécessaires pour créer une émission appréciable. Cependant, à cause du gain énorme possible avec le multiplicateur, l'émission par ailleurs imperceptible due à des champs relativement faibles peut causer des courants appréciables.

On sait [21] que le courant d'émission électronique I créé par un champ extracteur E agissant à la surface d'un conducteur est donné par la relation:

$$I = aE^2 e^{-\frac{b}{E}} \tag{41}$$

dans laquelle a et b sont des constantes qui dépendent de la nature du conducteur. Ces constantes sont en relation étroite

avec le travail de sortie, car il est bien évident qu'à une faible énergie nécessaire à la libération d'un électron correspondra une grande probabilité d'émission par un champ extérieur donné. En réalité l'émission thermique et l'émission due au champ sont presque toujours présentes simultanément. Si l'émission thermique prédomine, l'émission du champ se manifeste en ce que l'on appelle « l'effet de Schotky ». Si, au contraire, le champ prédomine, l'émission, appelée alors « l'émission froide » est indépendante de la température, en première approximation. Pour les besoins pratiques de ce travail, les deux phénomènes seront considérés indépendamment en dépit de leur relation.

Le gradient du champ est particulièrement grand aux endroits où les rayons de courbure de la surface sont petits. C'est pourquoi, comme on le sait, les bords tranchants, les pointes aiguës ou des particules collées à une surface lisse par ailleurs, sont d'excellentes sources d'émission froide. L'émission qui en résulte est généralement très erratique, parce que les propriétés des points émetteurs changent incessamment sous l'influence de la haute densité du courant qui provient d'une surface d'émission très petite.

b) *Expériences.*

Du point de vue des remèdes à appliquer, il est très important de pouvoir déterminer dans tous les cas la cause du courant résiduel. En particulier, lorsque l'expérience a montré que les fuites ohmiques et la réaction ionique n'y contribuent plus, il est important de pouvoir distinguer entre les émissions froide et thermique. Pour supprimer la première, un dessin approprié ou des soins spéciaux dans la construction peuvent être suffisants, tandis que la seconde dépend spécifiquement de la nature des surfaces émettrices (photo-électrique et à émission secondaire) utilisées. Bien des expériences furent imaginées pour les distinguer.

Le courant résiduel résultant de l'émission froide est généralement plus intense que celui auquel on doit s'attendre de

l'émission thermique à la température habituelle du laboratoire, et il est assez erratique en comparaison de la stabilité de ce dernier. Cependant, ces différences ne sont pas générales et on ne peut pas en juger â priori avant d'avoir établi, auparavant et par ailleurs, quels sont les ordres de grandeur en jeu.

Si toutes les électrodes émettent uniformément un courant i_s et si le gain par étage R est le même pour tous les n étages multiplicateurs, le courant résiduel I sera donné par la relation:

$$I = \frac{R^{n+1} - 1}{R - 1} i_s \cong \frac{R}{R - 1} G i_s \,. \tag{42}$$

Par conséquent, si le quotient du courant résiduel au coefficient $\frac{RG}{R-1}$, ou même simplement au gain G, reste approximativement constant lorsque la tension est variée, il y a lieu de croire que l'émission est uniforme et très probablement de nature thermique. Si, au contraire, ce quotient varie beaucoup (par un facteur supérieur à 5, par exemple) il est à présumer que c'est la tension même qui affecte l'émission et que, par conséquent, l'émission froide est la cause prédominante du courant résiduel. En général, dans ce dernier cas, l'émission froide est localisée à une électrode particulière et peut être évaluée en divisant le courant résiduel par le gain correspondant au nombre réduit des étages multiplicateurs. Cette émission devrait être régie par la relation (41), si elle était réellement d'origine froide. Il a été en effet observé, dans deux cas, que le logarithme du courant résiduel divisé par le coefficient approprié dépendait à peu près linéairement de l'inverse de la tension par étage. Ces mesures montrent clairement l'existence de l'émission froide. Cependant les constantes caractéristiques trouvées n'ont pas grande signification parce que la source de l'émission froide était purement accidentelle et sa véritable origine était inconnue.

Une autre expérience très simple peut être effectuée comme suit: Les fils connectant les diverses électrodes à leur source de potentiel sont déconnectés successivement, en commençant par les électrodes les plus négatives. Si toutes les électrodes y contribuaient uniformément, l'abandon d'un étage devrait

diviser le courant résiduel par un facteur égal au gain de l'étage abandonné. Si, cependant, cet abandon produit une diminution beaucoup plus grande (10 à 10.000 par exemple au lieu de 5 à 6) la contribution prédominante d'une électrode particulière est ainsi décelée. Dans la plupart des cas, cette contribution peut être attribuée à l'émission froide. Cependant on a observé avec des surfaces activées par un métal alcalin des émissions thermiques très intenses qui provenaient de régions dont le travail de sortie était particulièrement petit. Pour différencier ces deux possibilités, le potentiel de l'électrode considérée peut être varié par rapport à celui de l'électrode multiplicatrice suivante. Si ce potentiel est suffisamment différent de sa valeur nominale, les propriétés de concentration sont altérées et le gain décroît. Cela fut confirmé en étudiant l'effet qu'a le potentiel de la photo-cathode sur le courant de sortie utile. Si, en dépit de cette diminution du gain, le courant résiduel augmente lorsque le potentiel de l'électrode à émission prédominante est beaucoup plus négatif que sa valeur nominale, la forte dépendance de celui-ci par rapport à l'intensité du champ qui a augmenté, indique clairement une origine due à l'émission froide. Si, au contraire, le courant résiduel diminue (ou change très peu) l'origine de l'émission peut être déclarée thermique.

Bien d'autres expériences furent effectuées dans lesquelles la nature de l'émission produisant le courant résiduel fut jugée par la variation des potentiels d'opération. Elles étaient adaptées spécialement aux divers cas particuliers rencontrés.

Enfin, une méthode décisive pour distinguer entre les émissions thermiques et froides consiste à varier la température de l'ambiance du tube. S'il a été établi auparavant qu'il n'y a plus de réaction ionique, qui dépend de la pression, qui elle dépend de la température, et qu'un changement du courant résiduel est observé, son origine peut être déclarée thermique puisque l'émission froide est indépendante de la température. Cette méthode, qui sera décrite en détail, fut développée pour étudier l'émission thermique. Comme elle met en jeu une technique assez délicate, on y a eu recours seulement dans les cas où toutes les autres causes du courant résiduel furent presque complètement éliminées.

c) *L'élimination des effets de l'émission froide.*

Il n'y a malheureusement pas de méthode spécifique pour réduire l'émission froide d'une façon radicale. Cependant, une série de mesures peuvent être prises pour rendre négligeable son influence sur le courant résiduel. Elles consistent à réduire les gradients du champ, éviter les bords tranchants et autres points à grande courbure, utiliser des matériaux possédant un grand travail de sortie et finalement elles consistent à empêcher, par des protections convenables, que les électrons libérés par l'émission froide en dehors de la structure même des électrodes multiplicatrices ne soient multipliés ou même simplement collectés directement par le collecteur.

Puisque les valeurs des potentiels à utiliser sont déterminées par les conditions qu'exige l'efficacité de l'émission secondaire, l'intensité du champ peut être contrôlée seulement par la disposition géométrique des électrodes. Comme aux petites dimensions linéaires les champs sont intenses, il ne sera possible de construire un tube de petites dimensions que si l'on prévoit de grands interstices entre les électrodes. Ainsi qu'il apparaît par une inspection de la figure 8, un endroit particulièrement dangereux du point de vue de l'émission par le champ, se trouve au bord (de coordonnée zéro) des électrodes, puisque le champ y est particulièrement intense et qu'il y a une direction qui convient à l'extraction des électrons. La plupart des électrons émis seront collectés directement par l'électrode voisine et ne causeront par conséquent aucun mal. Cependant, grâce à la nature erratique de l'émission froide et à la complexité de la surface du bord de l'électrode à l'échelle miscroscopique, quelques-uns d'entre eux réussiront à heurter une des électrodes de la rangée opposée. Ces électrons seront multipliés et contribueront au courant résiduel. L'on se rendit compte de cet état dangereux dès que la réaction ionique fut suffisamment atténuée, et le dessin d'un type de multiplicateur nouveau fut cherché dans lequel ces interstices critiques seraient aggrandis. Dans cette recherche il fallait tenir compte de toutes les conditions imposées déjà par une concentration adéquate, les champs collecteurs intenses et la suppression de la réaction ionique.

Le type D (voir figure 6) dans lequel l'interstice critique est approximativement doublé fut élaboré grâce à l'aide du modèle mécanique. La forme des électrodes du type précédent fut conservée, seul leur arrangement fut changé. Les excellentes propriétés de concentration de ce type furent déjà décrites. La suppression de la réaction ionique est encore plus certaine dans ce type nouveau à cause du « recouvrement » des extrémités planes des électrodes. De plus la recherche du dessin nouveau possédant les mêmes directrices, arrangées à nouveau, montra qu'une inexactitude considérable pouvait être tolérée dans la construction de ce type sans affecter sérieusement la concentration.

On peut réduire encore plus l'émission du bord critique des électrodes en augmentant la courbure de celui-ci. Cela pourrait être fait simplement en enroulant ce bord sur lui-même. Cependant ce moyen compliquerait l'estampage des électrodes. Le moyen utilisé consiste à protéger les bords tranchants des électrodes par des bandes en forme de U. Ces bandes sont faites en nickel ayant 0,13 mm d'épaisseur, les bras du U ayant environ 1,5 mm. Elles sont appliquées sur le bord de l'électrode et sont ensuite fortement comprimées pour éviter la nécessité de la soudure électrique qui laisse en général de petites aspérités à la surface du métal. Pour éviter les extrémités tranchantes qui existeraient si on coupait les bandes à la longueur exacte des électrodes, celles-ci sont laissées plus longues et sont ensuite pliées de façon que leurs extrémités se joignent à l'autre bord de l'électrode. L'émission froide n'est pas observée en cet endroit à cause de la direction adverse du champ, de sorte que les extrémités tranchantes et la soudure électrique peuvent y être tolérés. La figure 10 B montre une électrode pourvue d'un arrangement protecteur de cette sorte. L'existence des bandes sur les côtés des électrodes produit simultanément l'effet de concentration latérale qui est désirable à bien des points de vue, comme on le sait.

Au début, les fils reliant les diverses électrodes au pied du tube étaient laissés nus. Les électrons libérés par le champ à leur surface, plus particulièrement près du pied où les champs sont intenses, pénétraient alors dans la structure des électrodes

et contribuaient, par conséquent, au courant résiduel directement ou après avoir été multipliés. Pour empêcher cela, les électrons libérés furent arrêtés par des tubes en verre protégeant la longueur tout entière des fils. Les seules parties laissées découvertes étaient aux endroits indispensables au contact avec les électrodes. A ces endroits on prit un soin particulier pour éliminer toute possibilité d'émission froide.

L'émission froide due à des particules de poussière ou à des aspérités collées à la surface des électrodes peut devenir très sérieuse. Pour la prévenir, la structure des électrodes, après son assemblage et avant d'être scellée dans son enveloppe de verre, est exposée pendant quelques secondes à une flamme de gaz brûlant avec un excès de gaz. Par ce procédé les aspérités fusibles sont fondues et les particules combustibles brûlées, sans cependant que l'argent des électrodes soit oxydé ou que la structure soit abîmée par ailleurs.

d) *Résultats.*

La figure 21 montre un multiplicateur qui satisfait à toutes les exigences imposées pour prévenir les fuites ohmiques, la réaction ionique et l'émission froide. Les deux rangées d'électrodes en nickel électrolytiquement recouvert d'argent sont

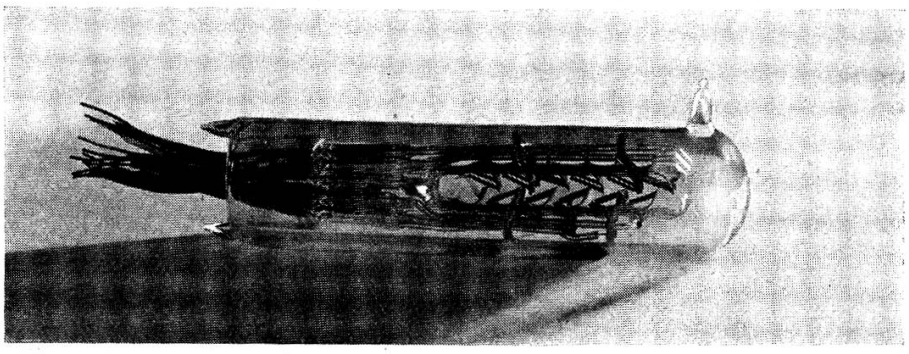

Fig. 21.
Multiplicateur à 10 étages du type D.

montées sur des plaques de verre reliées par des bras de verre l'une à l'autre, ainsi qu'au pied du tube. Les connections sont assurées par des fils flexibles qui sont entièrement protégés par des tubes en verre, même au voisinage du pied. Les bords tranchants des quatre écrans anti-ions en nickel sont dirigés

du côté des potentiels négatifs et ne constituent donc pas de source d'émission froide.

Dans plusieurs tubes de ce genre, la contribution du courant résiduel due à l'émission froide ne pouvait réellement pas être observée et la seule contribution restante était, sans aucun doute, l'émission thermique des électrodes.

Les surfaces émettrices de ce tube, et des tubes similaires, étaient traitées de la manière habituelle aux surfaces photoélectriques activées par un métal alcalin. Ce traitement procède essentiellement comme suit: L'argent est oxydé par une décharge électrique dans une atmosphère d'oxygène de 1 à 2 mm de Hg. Ensuite le métal alcalin (Cs, Rb, Li, Na ou K) est introduit dans le tube. Il est obtenu en général en chauffant par induction une petite capsule métallique contenant un mélange de l'oxyde de l'alcalin désiré avec un réducteur tel que l'aluminium ou le chrome. Le tube est alors chauffé pendant plusieurs minutes (10 à 30) à une température variant entre 150° et 270° C. suivant le métal utilisé. Ce traitement a fait l'objet de bien des publications [22] et ne sera pas décrit plus longuement.

Plusieurs multiplicateurs à dix étages analogues à celui qui est représenté par la figure 21 furent construits. Les mesures fournirent pour six d'entre eux, la tension étant de 200 volts par étage, les caractéristiques résumées par le tableau suivant:

Numéro du tube	1	2	3	4	5	6
Alcalin utilisé pour l'activation	Cs	Cs	Rb	Rb	Cs	Cs
Gain total en millions . .	10,0	4,2	2,2	5,0	1,0	10,0
Gain moyen par étage . .	5,01	4,59	4,29	4,68	3,98	5,01
Sensibilité de la photocathode en μA/lumens .	10	15	0,5	1	12	5
Sensibilité du tube en Amp/lumens	100	63	1,1	5	12	50
Courant résiduel à la température du laboratoire (27° C.) en μA	0,95	1,2	0,6	10	1,5	9
Intensité de lumière produisant un courant de sortie égal au courant résiduel, en lumens $\times 10^{-8}$	0,95	1,9	55,0	—	—	—
Cause principale du courant résiduel	émission thermique			émission froide		

LABORATOIRE DE PHYSIQUE UNIVERSITÉ NEUCHATEL

Les plus grands soins possibles furent pris dans la construction des tubes pour prévenir l'émission froide. En dépit de ces soins, dans la moitié des tubes construits, cette émission resta encore la cause principale du courant résiduel. L'émission froide est de toutes les causes du courant résiduel celle qui est la plus difficile à éliminer d'une façon radicale, c'est-à-dire d'une façon que l'on puisse reproduire à volonté. Dans la plupart des cas où elle prédominait, on ne pouvait rien déceler d'anormal en regardant l'électrode dont elle provenait. Il est très probable que c'est le métal alcalin qui produit cet état fâcheux, car on a observé en sa présence la création de points ayant un travail de sortie très faible. Ces points peuvent se trouver, par hasard, aux endroits où le champ est très intense. D'ailleurs, on verra par la suite que si l'usage du métal alcalin est évité pour le traitement des surfaces à émission secondaire, l'émission froide n'apparaît que dans une fraction très faible de cas, à condition que certaines autres précautions soient aussi prises.

Si, en plus des difficultés habituelles de la technique du vide, celles dues à un traitement par un métal alcalin de beaucoup d'électrodes disposées d'une façon compliquée sont à surmonter, la fabrication de multiplicateurs ayant de grandes sensibilités photo-électriques et à émission secondaire est un processus qu'il est difficile de reproduire avec de la constance. Souvent, après une première activation non satisfaisante, le tube a été vidé et activé à nouveau pour essayer d'améliorer son fonctionnement. Les caractéristiques du tableau ci-dessus se rapportent à l'état final des tubes.

La susceptibilité du multiplicateur pour la mesure des lumières de très faible intensité peut être exprimée par l'intensité de la lumière qui produit un courant de sortie égal au courant résiduel, ainsi qu'il a été indiqué sur le tableau. Cette intensité de lumière n'est évidemment pas la plus faible que l'on puisse déceler. Elle représente néanmoins l'ordre de grandeur des intensités qui peuvent être mesurées avec une grande précision. Lorsque le courant résiduel provient de l'émission froide, il est assez erratique et cette intensité de lumière perd de sa signification caractéristique. C'est pour cette raison qu'elle a été omise pour les tubes n°s 4, 5 et 6. La très grande sensibilité

des meilleurs tubes obtenus peut être appréciée, si on la compare à celle des cellules photo-électriques à vide ou même à gaz. Une lumière de 10^{-8} lumens, facilement mesurable par le multiplicateur, produit un courant de 5×10^{-13} amp. au plus dans une cellule à vide et 100 fois cette valeur au plus dans une cellule à gaz. Il est bien évident que la mesure directe de courants si faibles est à peine possible ou, même si elle l'est, elle devient extrêmement difficile.

5. L'émission thermique.

a) *Introductien.*

Le courant résiduel provenant de l'émission thermique est petit et stable, si on le compare à celui qui est dû à la réaction ionique ou à l'émission froide. Par conséquent, il ne diminue pas d'une manière sérieuse la capacité du multiplicateur à mesurer des lumières d'intensités faibles et constantes. A cause de sa stabilité relative, ce courant peut même être neutralisé par un circuit de compensation approprié. Cela est cependant une complication indésirable. Une objection plus sérieuse apparaît lorsque la lumière est modulée. Le rapport du signal au « souffle » (fluctuations dues au « shot effect ») est alors diminué par le souffle additionnel provenant du courant résiduel, ce qui se remarque surtout pour des signaux faibles. C'est ainsi que si la contribution thermique au courant résiduel n'est pas aussi fondamentalement gênante que celles dues aux autres causes, elle n'en est pas moins parfaitement indésirable.

La réduction du courant résiduel provenant des fuites ohmiques, de la réaction ionique et de l'émission froide fut réalisée surtout par une construction appropriée du multiplicateur. L'émission thermique ne saurait être traitée de la même manière, puisqu'elle dépend spécifiquement de la nature des surfaces émettrices et de leur température.

Etant donné la nature fondamentale de cette contribution thermique qui met une limite à une nouvelle diminution du courant résiduel, il fut décidé d'étudier la variation du courant résiduel en fonction de la température. Cette expérience fut

entreprise primitivement pour prouver d'une façon concluante que le reste du courant résiduel était vraiment d'origine thermique, chose qui fut établie bien vite. En effet, par un refroidissement approprié du multiplicateur, le courant résiduel atteignit une valeur très petite et l'appareil était susceptible de mesurer des intensités de lumière très faibles.

L'intérêt principal de cette expérience ne réside cependant pas en ce qu'elle fournit un instrument d'une certaine utilité, mais plutôt en ce qu'elle est une façon idéale de mesurer les constantes thermiques des surfaces à émission photo-électrique. Ceci est particulièrement important pour les surfaces traitées par un métal alcalin. En effet, lorsque la température de ces surfaces est variée de façon à ne pas altérer leur nature, le courant thermique est si petit que sa mesure directe est difficile même si l'aire de la surface émettrice est assez grande. Nous avons entrepris avec l'aide du multiplicateur de mesurer les constantes thermiques de l'oxyde d'argent traité au caesium.

L'émission thermique obéit à l'équation de Richardson

$$I = AT^2 e^{-\frac{B}{T}} = AT^2 e^{-\frac{eW}{kT}} \qquad (43)$$

dans laquelle I est le courant émis en ampères/cm^2, A est une constante en ampères/cm^2 dégré^2, T la température en degrés absolus et B une constante égale à

$$B = 1{,}16 \times 10^4 \times W \qquad (44)$$

si e, la charge de l'électron, est exprimée en coulombs, k, la constante de Bolzman, en joules/degré et W, le travail de sortie, en volts. La théorie a montré que A est une constante universelle, indépendante de la nature du corps émetteur et qu'elle est égale à:

$$A = 120 \text{ amp/cm}^2 \text{ deg}^2 \ . \qquad (45)$$

Les déterminations expérimentales fournissent, en effet, cette valeur pour beaucoup de métaux purs. Cependant, pour les surfaces composées, les valeurs mesurées de A diffèrent de la valeur théorique dans des rapports énormes (jusqu'à 10^{30}!). On explique cet écart en admettant que dans ce cas le travail

de sortie est une fonction de la température. Cette hypothèse conduit à une forme plus générale de l'équation de Richardson dans laquelle le coefficient B (ou le travail de sortie) est un développement en série de puissances de T. Cependant, on retient généralement la forme simple (43) de l'équation, même pour les surfaces composées, à cause de la difficulté énorme qui se présente lors de la détermination expérimentale des constantes de la série de l'équation généralisée. Les deux constantes A et W caractérisent donc une surface donnée. Les résultats des mesures sont généralement exprimés en portant le log (I/T^2) en fonction de $(1/T)$. Une droite est dessinée de façon à correspondre au mieux aux points expérimentaux. La pente de cette droite et sa position par rapport aux axes déterminent respectivement le travail de sortie W et la constante A. Ainsi qu'on le sait, la plupart des expériences fournissent une valeur relativement précise du travail de sortie W tandis que de grandes erreurs sont généralement présentes dans la détermination de la constante A. Le but de nos expériences est strictement limité à la détermination du travail de sortie de certaines surfaces traitées par un métal alcalin.

b) *L'appareillage expérimental.*

La variation de la température des surfaces activées par un métal alcalin, le caesium en particulier, qui est appropriée à la détermination du travail de sortie, a une limite supérieure, environ 100° C, au-dessus de laquelle les propriétés de la surface seraient altérées en permanence. Il a aussi une limite inférieure, environ — 50° C, au-dessous de laquelle le courant d'émission n'est pas mesurable même lorsqu'il est multiplié par l'énorme gain du multiplicateur. Pour utiliser entièrement toute la variation de température disponible, il est nécessaire de pouvoir mesurer des courants très faibles aux basses températures. Par conséquent, il est essentiel que les fuites ohmiques externes soient aussi petites que possible pour qu'elles ne masquent par le courant d'origine interne. La réalisation de ce besoin est rendue difficile par la vapeur d'eau de l'atmosphère qui, si on ne l'empêche, se condense sur et entre les divers conducteurs du tube et devient ainsi la cause de fortes fuites ohmiques.

Dans les multiplicateurs décrits antérieurement, les électrodes émettrices sont thermiquement bien isolées de l'enveloppe de verre du tube, car elles prennent la température de celle-ci principalement par radiation et partiellement seulement par la conductibilité thermique de leurs supports. Pour arriver à connaître avec certitude la température des électrodes, il faut donc que celle du tube varie lentement et soit uniforme.

Une méthode expérimentale pratique qui permet une variation de température lente et uniforme et en même temps qui résoud la question des fuites ohmiques consiste à faire circuler un liquide entre un récipient contenant le tube et une spirale métallique ayant une grande surface, et dont la température peut être contrôlée à volonté. Le liquide ne doit pas être hygroscopique, il doit avoir une faible conductibilité électrique, son point d'ébullition doit être supérieur à 100° C et il doit conserver à — 50° C une viscosité suffisamment faible pour ne pas gêner la circulation. Le pétrole, essayé tout d'abord, satisfait à toutes ces exigences sauf la dernière. L'éthylbenzène purifié ($C_6H_5 . C_2H_5$) est parfaitement satisfaisant.

L'appareillage utilisé est illustré par la photographie 22 et il est dessiné schématiquement sur la figure 23. Le liquide circule du récipient TH, à travers la pompe P, la spirale S et le filtre F, pour retourner au récipient TH.

Le récipient TH est une bouteille thermos. Une région de sa surface n'a pas été couverte par la couche métallique réfléchissante pour permettre d'éclairer le multiplicateur. Le bon isolement thermique de la bouteille économise la chaleur (ou « le froid ») de la source de chaleur et empêche que la condensation de la vapeur d'eau n'obstrue la fenêtre réservée à l'éclairement.

La pompe P est simplement une pompe à essence pour bateaux, type à membrane vibrante. Elle est mue par un accumulateur de 6 volts et produit une circulation d'environ 3 litres à la minute.

La spirale de cuivre S est immergée dans un bain B. Pour élever la température au-dessus de celle du laboratoire, on chauffe simplement de l'eau dans B. Dans ce but on utilise un réchaud électrique de préférence à un bec Bunsen à cause du

BIBLIOTHÈQUE DE L'UNIVERSITÉ NEUCHATEL

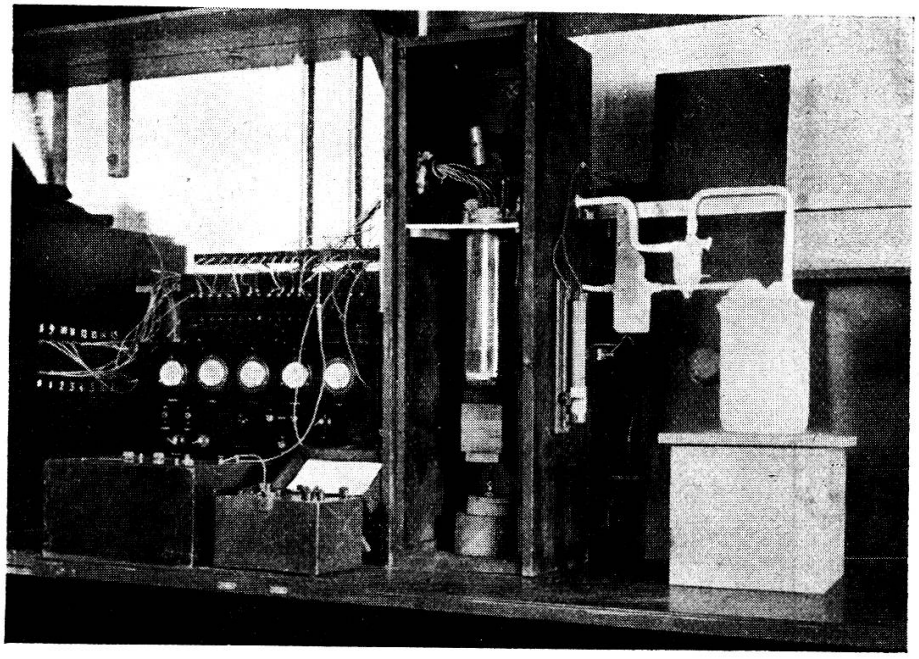

Fig. 22.

Appareil pour la détermination des constantes thermiques.

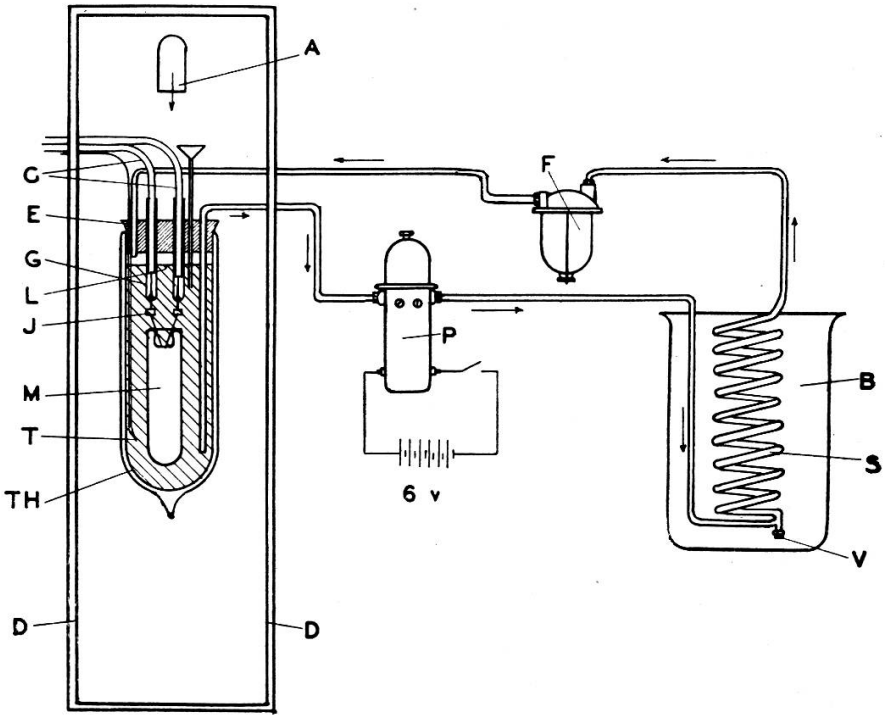

Fig. 23.

Appareillage pour la détermination du courant thermique.

danger d'explosion de l'éthylbenzène. Pour abaisser la température, un bain constitué par un mélange de glace carbonique (CO_2) et d'alcool est utilisé. La température minimum obtenue par ce moyen, mesurée dans le récipient TH était de — 75° C., ce qui est plus bas que nécessaire. Pour la vidange un robinet V fut aménagé dans la spirale.

Le filtre F, un filtre à essence d'automobile, n'est pas absolument nécessaire. Cependant grâce à cette précaution de propreté supplémentaire, il était possible de se servir du même liquide pour plusieurs expériences.

Les conducteurs C qui sont nécessaires aux courants du multiplicateur M, sont isolés par une épaisse couche de caoutchouc supportant une tension nominale de 10.000 volts. L'éthylbenzène dissout le caoutchouc ce qui augmente sa conductibilité. Le même inconvénient se présente pour tous les autres liquides et isolations qui furent envisagés. Pour empêcher cette dissolution du caoutchouc, les fils C sont terminés par des tubes de verre G dans lesquels ils sont scellés. Ces tubes, plantés dans un bouchon E, sont immergés profondément dans le liquide de manière qu'en dépit des variations du niveau dues à la dilatation du liquide, les fils nus restent au sein du liquide. Cela élimine la possibilité des fuites ohmiques provenant de la condensation de la vapeur d'eau au pied du tube. Le multiplicateur M pend par ses fils qui sont maintenus par de simples fiches J. Pour simplifier le dessin, deux fils seulement sont indiqués sur la figure 23 au lieu des 16 fils réels de l'appareil.

L'eau qui se condense sur le bouchon E ne produit pas de fuites ohmiques à cause du bon isolement des fils. Cependant, comme précaution supplémentaire, de l'air chaud et sec est amené sur cet endroit par le tuyau A. Un simple « fœhn » est utilisé dans ce but. L'eau est absorbée par du chlorure de calcium introduit dans la circulation de l'air.

Pour assurer une parfaite obscurité, le récipient TH est contenu dans une boîte D. On met à l'épreuve l'efficacité de la protection de cette boîte en observant qu'une forte illumination extérieure ne produit aucun changement du courant résiduel.

La température du liquide est mesurée par un couple thermo-électrique T. Le calibrage des Tables Critiques Internationales a été utilisé.

Certaines difficultés techniques furent rencontrées tout d'abord. Elles provenaient des fuites ohmiques, des fuites du liquide et d'une protection incomplète contre la lumière. Elles furent surmontées bien vite et l'appareil fonctionna parfaitement dorénavant. L'isolement était suffisant pour permettre des mesures sûres de courants de l'ordre de 10^{-10} ampères lorsque la tension totale était de 2500 volts.

c) *Les mesures initiales.*

Les tubes de la table de la page 296 ont été construits dans le but de déterminer les constantes thermiques des surfaces émettrices aussi bien que pour être susceptibles de mesurer de faibles intensités de lumière. Le traitement par métal alcalin de leurs électrodes est, comme on l'a vu, une opération délicate dont le résultat est, en général, une sensibilité secondaire inégale des diverses électrodes. Il est donc à présumer que l'émission thermique sera aussi différente suivant les électrodes. Ce fait est d'ailleurs confirmé par l'expérience. Les hypothèses faites pour la dérivation de l'équation (42) ne sont donc pas valables et le courant résiduel d'origine thermique n'est pas proportionnel à l'émission d'un étage donné quelconque.

Dans le cas des émissions thermiques inégales, on peut établir une propriété générale assez intéressante. Dans ce cas le courant résiduel I peut être exprimé par la relation

$$\mathrm{I} = \mathrm{T}^2 \sum_{s=1}^{s=n} a_s e^{-\frac{b_s}{\mathrm{T}}} \cdot \tag{46}$$

Dans cette expression les constantes a_s tiennent compte des constantes A de l'équation de Richardson et des gains partiels correspondants à l'étage de multiplication s, les constantes b_s

sont proportionnelles aux travaux de sortie et n est le nombre des électrodes émettrices. En posant $x = 1/\mathrm{T}$ on peut écrire:

$$y = \log\left(\frac{\mathrm{I}}{\mathrm{T}^2}\right) = \log \mathrm{I} + 2\log x = \log\left(\sum_{s=1}^{s=n} a_s e^{-b_s x}\right) \qquad (47)$$

et calculer aisément la valeur de d^2y/dx^2

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\sum_s \sum_k a_s a_k (b_s - b_k)^2 e^{-x(b_s + b_k)}}{\left(\sum_s a_s e^{-b_s x}\right)^2} . \qquad (48)$$

Dans l'expression (48), s et k sont des indices de sommation variant entre 1 et n. Si les travaux de sortie, c'est-à-dire les coefficients b_s et b_k, sont inégaux, l'expression (48) sera toujours positive, et par conséquent la courbe de Richardson $y = y(x)$ pour laquelle le courant résiduel total serait utilisé pour l'ordonnée, aura toujours une courbure positive. En effet, des courbes de ce genre eurent toujours des courbures nulles ou positives dans tous les cas examinés au cours de ce travail. Cela prouve clairement qu'il y a de très grandes variations dans les propriétés thermiques d'électrode à électrode, puisque celles-ci peuvent être décelées par un moyen si indirect et en dépit de l'effet compensateur provenant des grandes différences du facteur de multiplication des émissions des diverses électrodes.

Il résulte de ce qui précède que la contribution au courant résiduel d'une seule électrode doit être considérée, si l'on veut obtenir des résultats significatifs. La photo-cathode est tout indiquée dans ce but, puisque pour elle le gain est le plus grand. C'est pourquoi la diminution du courant résiduel qui résulte de la suppression de la contribution de la photo-cathode obtenue par une certaine variation appropriée de la tension de cette dernière fut considérée comme une mesure de l'émission thermique et fut étudiée en fonction de la température.

Ainsi qu'il a été expliqué, la température des éléments internes du tube diffère, en général, de celle de l'enveloppe de

verre, c'est-à-dire de celle du liquide ambiant, et n'égale celle-ci que dans un état stationnaire. Pour obtenir une indication sûre et continue de la température de la photo-cathode, un couple thermo-électrique fut monté à l'intérieur des tubes et mis en contact direct avec le métal de la photo-cathode. Il est difficile de sceller du constantan et du cuivre à travers le verre (verre doux ou Pyrex) ou bien de sceller deux autres métaux qui conviendraient à un couple thermo-électrique. C'est pourquoi l'expédient suivant a été adopté [23]. Le couple est constitué par des fils très fins, soudés électriquement aussi près du verre que possible, aux fils de « nichrome » scellés dans le pied. A l'extérieur, un fil de constantan est soudé au fil en contact interne avec le fil de constantan. Il en a été de même pour le cuivre. De cette manière, dans chaque conducteur, deux forces électromotrices thermiques opposées furent produites, qui se compensent parfaitement à condition qu'il n'y ait pas de différence de température entre les deux côtés de la paroi de verre.

Bien des difficultés furent rencontrées dans les expériences. Elles peuvent être attribuées au traitement alcalin des électrodes et peuvent être résumées comme suit:

Premièrement, ainsi qu'il a été dit, c'est seulement par un hasard heureux que l'émission thermique de la photo-cathode est la cause prédominante du courant résiduel. Les mesures sont encore possibles dans le cas contraire, mais leur précision en souffre et peut même devenir insuffisante.

Deuxièmement, il arrive que la valeur du courant résiduel à une température donnée dépende de la manière de laquelle cette température a été atteinte, c'est-à-dire par refroidissement ou par échauffement. La courbe correspondante ressemble à une courbe d'« hystérèse ». Une relation peut être établie entre ce phénomène et la distribution des contributions au courant résiduel des diverses électrodes. Cette distribution est, en effet, entièrement différente à une température donnée (celle du laboratoire) après que la température du tube a été changée et ramenée ensuite à sa valeur originelle. Ces phénomènes peuvent être attribués aux migrations d'électrode à électrode du métal alcalin à l'état libre.

Enfin, parfois, après un intense éclairement du tube produisant un fort courant de sortie, le courant résiduel prenait pour commencer une valeur assez grande et décroissait ensuite asymptotiquement. La valeur stationnaire était souvent 50 fois plus petite que la valeur initiale observée et n'était atteinte dans certains cas qu'après 30 à 40 minutes. Ce phénomène, quoiqu'il ne soit pas entièrement expliqué, peut aussi être attribué à des migrations du métal alcalin, parce qu'il ne fut jamais observé dans les tubes qui ne contenaient pas un tel métal, ainsi qu'il sera indiqué dans la suite.

En dépit de ces difficultés, l'expérience réussit avec le tube n° 3 de la table de la page 296, dont les électrodes étaient traitées au rubidium. Dans ce tube, la contribution au courant résiduel de la photo-cathode prédominait. Le phénomène de la diminution du courant résiduel était particulièrement prononcé. Les mesures ont été faites à l'état stationnaire. L'expérience a été répétée et a fourni chaque fois $W = 1{,}03$ volt et des valeurs de A égales respectivement à 5×10^{-9} et 50×10^{-9} amp/cm^2 deg^2. A cause de cette variation dans les résultats et à cause du phénomène de « diminution », ces résultats ne doivent pas être considérés comme aussi sûrs que ceux qui seront obtenus plus tard pour l'oxyde d'argent traité au caesium. C'est pourquoi la courbe de Richardson a été omise dans ce cas.

Le tube n° 1 de la même table, traité au caesium, ne possède pas de couple thermo-électrique interne, de sorte que seuls les états stationnaires pouvaient être examinés. Le courant résiduel était de 0,004 μA à –71,3° C, 0,95 μA à 27° C et 65,0 μA à 98,4° C. Ces trois valeurs ne suffisent pas à une détermination autre que très approximative du travail de sortie. Cependant, il est intéressant d'observer la grande sensibilité du tube à — 71,3° C, puisque à cette température une lumière de 4×10^{-11} lumens produit un courant de sortie égal au courant résiduel.

Il est possible que des perfectionnements appropriés de ce genre de multiplicateur dont les électrodes sont traitées par un métal alcalin suffiraient à l'obtention des résultats désirés. Cependant le développement de ce type de multiplicateur fut arrêté en ce point, grâce à la découverte d'un corps ayant un

grand coefficient d'émission secondaire et n'exigeant aucun traitement dans le vide.

d) *Le multiplicateur à cloison.*

Une méthode habituelle du traitement simultané par un métal alcalin de beaucoup d'électrodes en argent ne fournit pas de résultats uniformes ni reproductibles. De plus, le métal alcalin est particulièrement nuisible à la réduction du courant résiduel parce que son dépôt sur les isolants augmente les fuites ohmiques, sa présence produit des places où l'émission froide est particulièrement forte et enfin sa migration incessante produit une émission thermique instable.

A la suite d'une investigation générale des surfaces à émission secondaire faite dans notre laboratoire, un corps fut découvert dont la sensibilité ne dépend d'aucun métal alcalin et qui ne nécessite aucun traitement dans le vide. C'est un alliage dont le coefficient d'émission secondaire varie entre 5 et 6 pour une vitesse de bombardement primaire de 200 électrons-volts. Il peut être facilement laminé en feuilles qui peuvent être ensuite embouties. Une description détaillée de la préparation et des propriétés de ce corps sera publiée [24].

La découverte de ce matériel élimine la nécessité d'utiliser des surfaces alcalines pour les électrodes multiplicatrices et élimine ainsi bien des difficultés. Cependant, la sensibilité photo-électrique de cet alliage étant nulle (ou du moins non mesurable) dans la partie visible du spectre, il est encore nécessaire d'utiliser un autre corps pour la photo-cathode. Si une surface photo-électrique traitée par un métal alcalin est retenue pour cet usage, il devient important de pouvoir empêcher les vapeurs alcalines de pénétrer jusqu'aux électrodes multiplicatrices et leurs supports, puisque leur présence est nuisible à la réduction du courant résiduel. Pour cela, il serait désirable d'avoir un multiplicateur dans lequel la photo-cathode et les électrodes multiplicatrices pussent être entièrement isolées les unes des autres pendant le traitement de la photo-cathode. Ce traitement fini, une voie d'accès serait établie entre les deux parties du tube, à travers laquelle passent les photo-

électrons qui iraient bombarder la première électrode multiplicatrice. Par ailleurs, l'intérêt qu'offre la possibilité de traitements indépendants des surfaces à émission secondaire et photo-électrique est plus général, parce que les surfaces ayant une sensibilité très grande pour un type d'émission ne sont pas nécessairement les meilleures pour l'autre.

Pour faciliter la détermination des constantes thermiques, il est désirable que la photo-cathode de ce multiplicateur du type « à cloison » soit portée directement par la paroi de verre. La température de celle-ci est alors égale à celle du milieu ambiant et peut être déterminée sans la complication supplémentaire

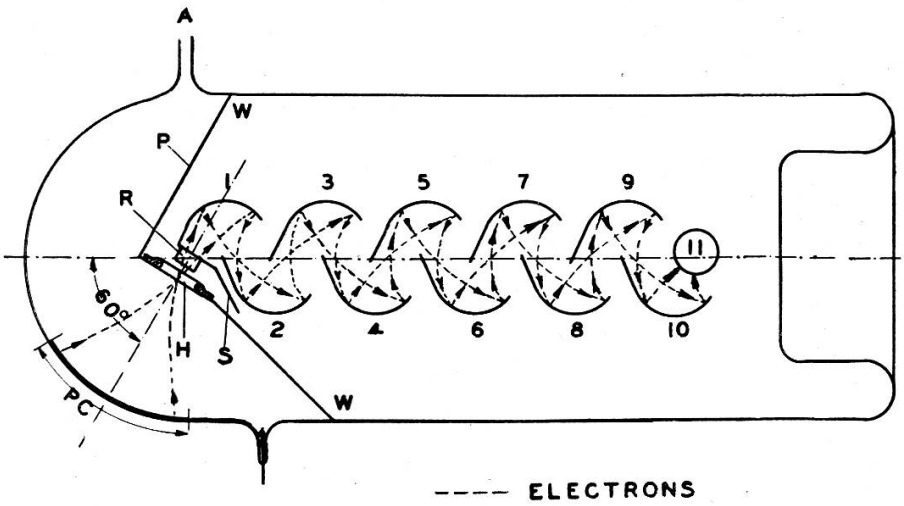

Fig. 24.

Le multiplicateur à cloison.

qu'introduit un couple thermo-électrique interne. Cela restreint le choix de la forme de la photo-cathode à une forme qui peut être facilement soufflée et ajoute ainsi une condition au problème du dessin d'un système d'optique électronique susceptible de forcer les photo-électrons à traverser un passage étroit.

Le dessin d'un multiplicateur à cloison fut obtenu grâce aux méthodes d'optique électronique décrites précédemment et plus particulièrement grâce au modèle mécanique. La figure 24 représente une coupe longitudinale du tube. Les électrodes multiplicatrices n°s 2 à 10 sont identiques à celles du type D. La première électrode n° 1 porte un écran S pourvu en son centre

LABORATOIRE DE PHYSIQUE UNIVERSITÉ NEUCHATEL

d'un cylindre circulaire R dont l'axe est dans le plan de la figure. La cloison métallique P, dont les bords s'adaptent exactement à l'enveloppe du tube, porte un trou H coaxial avec R. Les bords de ce trou peuvent devenir une origine d'émission froide. Pour écarter ce danger, un anneau épais, tourné et poli est soudé à la cloison à cet endroit. L'enveloppe du tube qui est un cylindre circulaire est terminée par un hémisphère. A l'intérieur, une partie métallisée de cet hémisphère constitue la photo-cathode. Pendant le traitement de la photo-cathode, le trou H est formé par un volet approprié, qui peut être par exemple une petite plaque de mica posée sur le plan central de la cloison P, placé horizontalement dans ce but. Les deux parties du tube sont ainsi entièrement isolées l'une de l'autre et le métal alcalin introduit par le tube latéral A ne peut pas contaminer les électrodes multiplicatrices. Le traitement fini, le trou H est ouvert et le tube est prêt à fonctionner. La photo-cathode sphérique PC, l'ouverture H et le cylindre R créent un champ à symétrie axiale qui guide les photo-électrons à travers le trou H et les force à bombarder la partie active de l'électrode n° 1. L'écran S et le cylindre R séparent presque complètement les champs cylindriques et à symétrie axiale qui ne se combinent que dans une très petite région au voisinage de R. A partir de l'électrode n° 1 jusqu'à l'électrode n° 10, la marche du faisceau électronique se poursuit comme dans le type D. Le collecteur n° 11 est un cylindre circulaire dont le dessin fut conçu lors du développement d'un autre genre de multiplicateur, dans le but d'accroître le champ collecteur [25]. Il est utilisé ici parce qu'il est facile de le monter directement par son fil et d'empêcher ainsi les fuites ohmiques qui résulteraient de son contact avec les supports isolants des autres électrodes.

L'emploi de l'alliage pour les électrodes et la suppression du métal alcalin qui en résulte, facilitent beaucoup la construction et la prévention des effets nuisibles de l'émission froide et de la réaction ionique. La structure des électrodes ne doit plus être « ouverte », ainsi que le nécessitait l'efficacité du traitement. Les électrodes sont montées sur deux plaques de mica convenablement perforées dont l'emploi avait été évité

jusqu'alors à cause des fuites ohmiques résultant de la pénétration du métal alcalin dans les couches de clivage. Des bandes de nickel en forme de U sont fixées sur chacun des deux bords des électrodes pour éviter complètement la soudure. Les prolongements passent par les trous des mica, maintenant les électrodes dans leur position exacte. Deux autres feuilles de mica sont disposées tangentiellement à l'arrière des électrodes et enferment ainsi toute la structure dans une boîte de mica étanche. Une des extrémités de cette boîte est terminée par la cloison P et l'autre par un disque de mica. Cet arrangement élimine complètement la réaction ionique. Les fils reliant les électrodes au pied du tube peuvent être laissés nus puisque un électron libéré à leur surface par émission froide ou toute autre, ne peut pas pénétrer jusqu'aux électrodes multiplicatrices qui sont complètement protégées par la boîte de mica. Les électrons libérés dans l'espace compris entre le disque en mica et le pied du tube sont encore nuisibles puisqu'ils peuvent venir bombarder le fil du collecteur. C'est pourquoi l'on évite avec soin les points saillants dans cet espace. La figure 25 montre l'assemblage complet juste avant qu'il ne soit scellé, et la figure 26 le tube fini.

Les multiplicateurs de ce type étaient satisfaisants à bien des points de vue. Dans plusieurs tubes à 9, 11 et 12 étages respectivement, le gain moyen par étage était compris entre 3,7 et 4,9 lorsque la tension par étage était de 200 volts. Cela correspond à un gain total de 10^6 à 10^7. Le traitement par métal alcalin de la photo-cathode est plus simple que celui de l'ensemble des électrodes du type précédent et l'on devrait donc s'attendre à une sensibilité supérieure. Cependant, à cause de divers accidents, la meilleure sensibilité obtenue n'était que de 10 μA/lumen. De plus, le champ à la surface de la photo-cathode (qui dépend du cylindre R dont l'effet est fortement masqué par la cloison P) est assez faible, de sorte qu'avec les tensions habituelles le courant photo-électrique n'est pas saturé. Cependant, ce manque de saturation n'affecte pas la linéarité de l'émission en fonction de l'intensité de la lumière mais cause une perte des électrons disponibles qui est inférieure à 40% lorsque la tension est de 200 volts par étage.

En général, le courant résiduel est très petit et les fuites ohmiques et la réaction ionique n'y contribuent pas. Cependant les effets de l'émission froide étaient encore observés dans certains cas, à un degré moindre, il est vrai, que dans les tubes

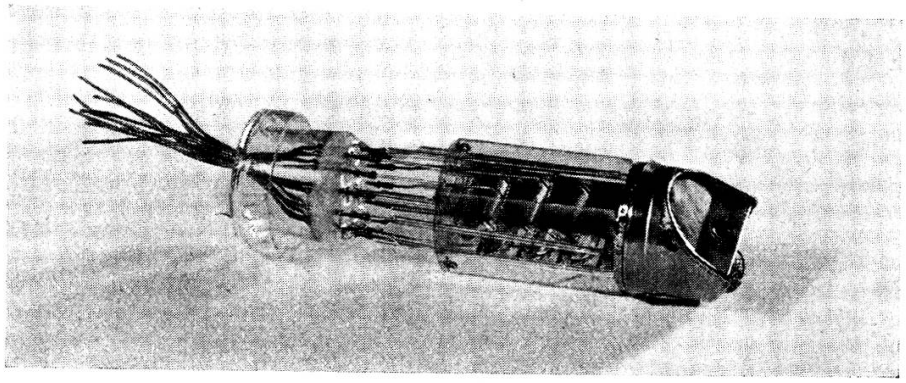

Fig. 25.

Assemblage complet d'un multiplicateur à cloison.

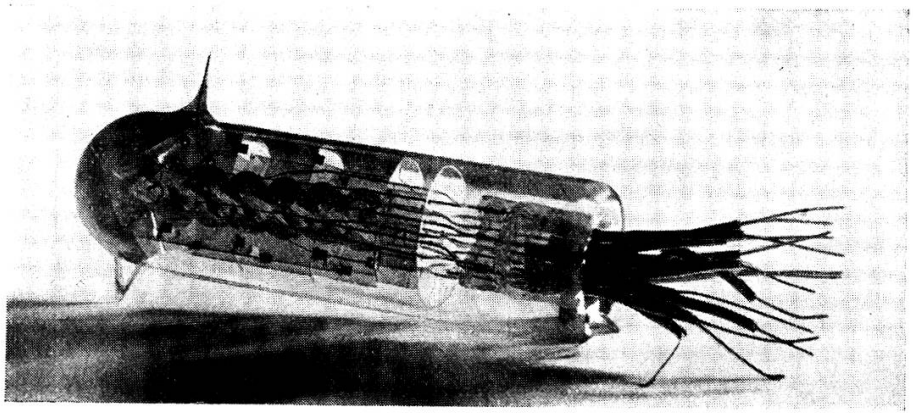

Fig. 26.

Multiplicateur à cloison à 10 étages.

du genre précédent. L'origine de cette émission froide se trouvait dans des endroits répartis au hasard dans les divers tubes, de sorte qu'il n'est pas possible de l'attribuer à une cause définie.

e) *La détermination des constantes thermiques de la surface d'oxyde d'argent traitée au caesium.*

Le multiplicateur à cloison employé pour cette détermination fonctionna parfaitement à tous les points de vue. Il avait onze électrodes en alliage. Le gain moyen par étage était de 3,7 pour une tension de 200 volts par étage. Le gain total était de $1,5 \times 10^6$ à 200 volts par étage et 600.000 à 180 volts par étage. La sensibilité de la photo-cathode était de 10 μA/lumen.

Le courant résiduel était presque entièrement d'origine thermique. Ce fait pouvait être vérifié par l'un quelconque des essais déjà décrits ou bien de la façon suivante. La photo-cathode est reliée à la cloison P en fonctionnement normal. Cependant cet état peut être changé à volonté dans ce tube parce que la couche d'argent formant la photo-cathode PC, qui n'est pas en contact interne avec la cloison, est reliée à un fil séparé scellé dans le verre. Les courants de sortie résultant respectivement de l'éclairement et de l'obscurité furent mesurés en fonction de la tension V_0 entre la cloison P et la photo-cathode PC. Ces deux courants sont proportionnels entre eux de sorte que, pour simplifier, seule la variation du courant résiduel est représentée par la figure 27. Pour des valeurs négatives de V_0, les électrons libérés ne s'échappent que grâce à leur énergie initiale, ils peuvent être arrêtés complètement par une barrière de potentiel de quelques volts. Pour des valeurs positives de V_0, le courant croît tout d'abord grâce au champ collecteur plus intense et à une « optique » améliorée. Pour des valeurs positives de V_0 encore plus grandes, le courant diminue à cause de la « déconcentration » (ce qui n'est pas montré sur la courbe de la figure 27). Cette expérience montre d'une façon indubitable que presque la totalité du courant résiduel provient bien de l'émission de la photo-cathode.

Lorsque l'émission de la photo-cathode est supprimé, en rendant $V_0 = V$, c'est-à-dire en reliant la photo-cathode PC à la première électrode multiplicatrice, il reste encore un courant résiduel très petit qui dépend légèrement de la température. Ce courant, provenant de la partie purement multiplicatrice du tube, était compris entre 0,003 et 0,0003 μA, et

il fut soustrait du courant résiduel total. Cette correction est importante surtout aux basses températures.

Les résultats des mesures du courant thermique en fonction de la température sont illustrés par la courbe de la figure 28. L'abcisse est proportionnelle à l'inverse de la température absolue. L'ordonnée est le logarithme de la densité du courant émis à la photo-cathode. L'aire de la partie effective de la

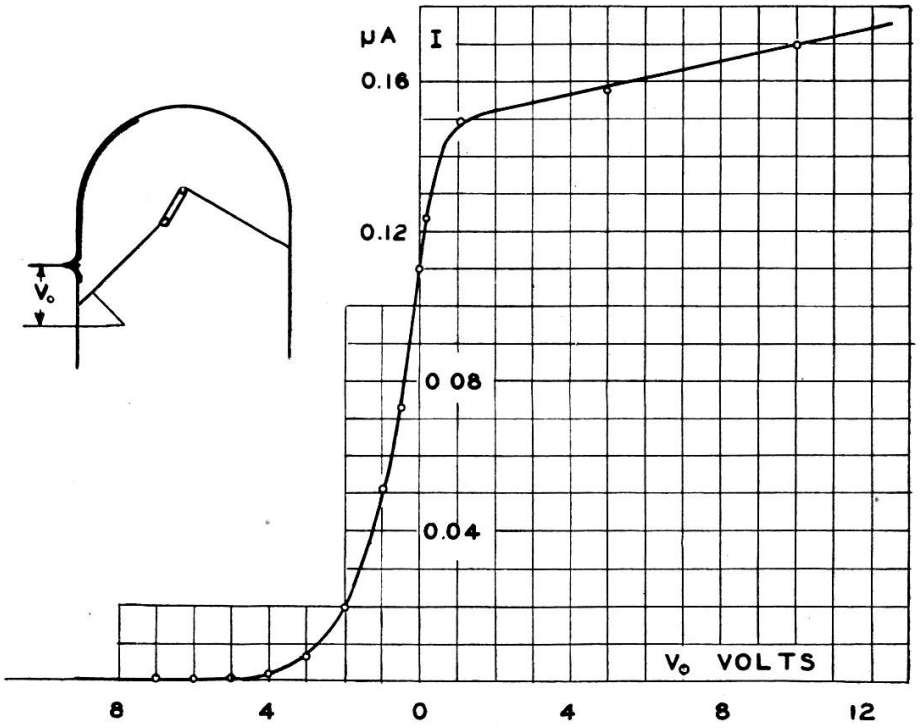

Fig. 27.

Courant résiduel en fonction du potentiel de la photo-cathode dans un multiplicateur à cloison.

photo-cathode fut déterminée en explorant celle-ci avec une petite tache lumineuse. Elle fut trouvée égale à 3,3 cm². La tension par étage fut maintenue à 180 volts, ce qui correspond à un gain total de 600.000.

La courbe qui suit le mieux les points expérimentaux a une légère courbure positive. La présence de celle-ci peut être expliquée au moyen des deux hypothèses suivantes:

a) Il existe, en dehors de l'émission thermique, une autre émission constante provenant de la photo-cathode, émission qui ne dépend pas de la température. Cette émission est déterminée de telle sorte que quand elle est déduite de l'émission

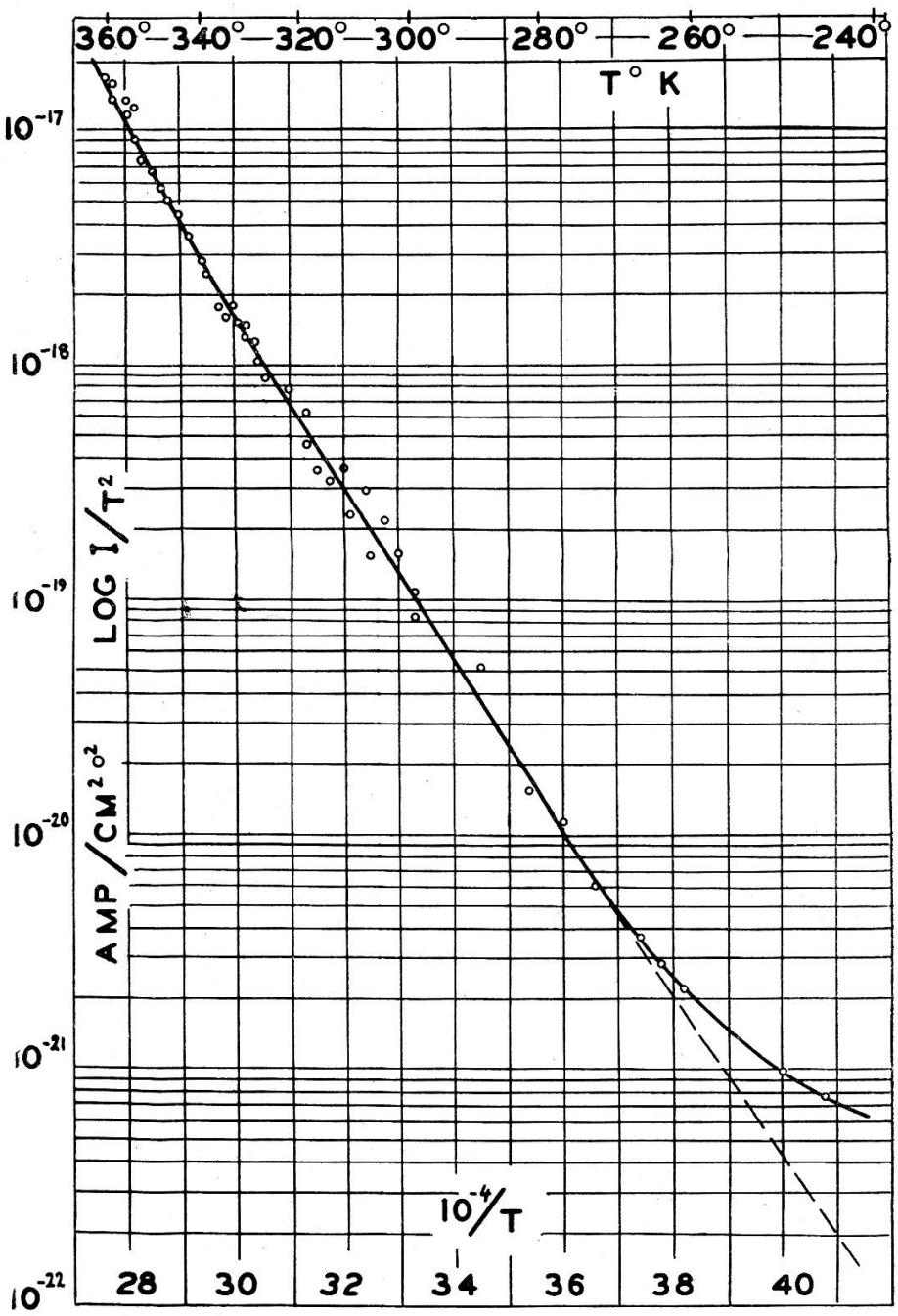

Fig. 28.

Courbe de Richardson pour l'oxyde d'argent traité au cæsium.

totale, la courbe résultante est aussi voisine que possible d'une droite de Richardson. Un choix de 3×10^{-17} amp/cm², c'est-à-dire approximativement 200 électrons par cm² et par seconde, correspond à la ligne pointillée que l'on remarque aux basses températures ($1/T = 3{,}9$ à $4{,}2 \times 10^{-5}$). Bien des phénomènes pourraient être invoqués pour expliquer cette émission secondaire, tels que, par exemple, l'émission froide, la radiation cosmique, la radio-activité des parois de verre, etc. Ceux-ci ne seront pas examinés parce que l'hypothèse de cette émission constante n'a été faite que pour expliquer la forme de la courbe expérimentale.

b) On a vu (voir équation 48) que lorsqu'un courant est la somme d'émissions thermiques diverses caractérisées toutes par des travaux de sortie différents, la courbure de la courbe de Richardson est toujours positive. Par conséquent, la courbure positive réduite, mais non nulle, de la courbe déjà corrigée suivant l'hypothèse *a*) peut être expliquée en supposant que la photo-cathode n'est pas sensibilisée uniformément et que le travail de sortie n'est pas le même pour tous les points de sa surface.

C'est ainsi que, en réalité, il n'existe pas de constantes A et W bien définies qui caractérisent la surface. Cependant, on peut dessiner une droite qui passe au mieux par les points expérimentaux, avec l'hypothèse de la validité absolue de l'équation de Richardson. On peut alors envisager que l'équation correspondante

$$I = 2{,}5 \times 10^{-7}\, T^2 e^{-\frac{8750}{T}} \text{ amp/cm}^{-2} \qquad (49)$$

représente les données expérimentales avec la meilleure approximation possible. Les constantes sont donc $A = 2{,}5 \times 10^{-7}$ amp/cm² deg² et $W = 0{,}75$ volt. De plus on peut supposer raisonnablement, grâce à l'hypothèse *b*), que les tangentes de la courbe aux températures hautes et basses respectivement, correspondent aux cas extrêmes déterminant les limites de variation du travail de sortie à la surface de la photo-cathode. Les constantes de ces droites sont respectivement $A = 1{,}6 \times$

10^{-6} amp/cm² deg², W = 0,80 volt et A = 2,3 × 10^{-8} amp/cm² deg², W = 0,70 volt.

Ces mesures ont montré premièrement la non-uniformité de l'émissivité de la photo-cathode et deuxièmement, que si l'opposé n'en est pas moins admis et l'écart entre les courbes expérimentales et théoriques est attribué à des erreurs expérimentales, le travail de sortie est W = 0,75 volt (± 0,05 volt) et la constante A, A = s × 2,5 × 10^{-7} amp/cm² deg² ($0,1 < s < 10$).

Les mesures faites avec un multiplicateur magnétique dont les électrodes étaient aussi d'oxyde d'argent traité au caesium fournirent un travail de sortie de W de 0,70 volt et une constante A = 2,2 × 10^{-7} amp/cm² deg². Cette détermination n'est pas aussi sûre que celle qui vient d'être décrite parce que les contributions au courant résiduel de la réaction ionique et de l'émission thermique des autres électrodes ne furent pas éliminées. Cependant, il est remarquable que les valeurs trouvées soient comprises entre les limites expérimentales des mesures ci-dessus.

Il ressort des mesures et autres données accumulées au cours de ce travail que l'émission thermique de l'oxyde d'argent traité au caesium est très variable. C'est pourquoi, à moins que l'on n'arrive à perfectionner une méthode susceptible de fournir des résultats reproductibles, il n'y a aucun intérêt à déterminer très exactement des constantes thermiques. La valeur du travail de sortie trouvée peut être comparée à celle que l'on peut déduire du seuil de fréquence. Les expériences précédentes montrent indubitalement que le courant résiduel est, pour finir, dû à l'émission thermique, et fournissent, de plus, une première approximation des constantes thermiques. Le seuil en longueur d'onde pour cette surface est compris entre 12.000 et 16.000 Å, ce qui correspond à un travail de sortie de 0,77 à 1,03 volt. Les valeurs obtenues par des phénomènes thermiques et photo-électriques sont donc approximativement égales, la première étant légèrement inférieure à la seconde.

L'intensité du courant résiduel à la plus basse température atteinte présente un intérêt tout particulier. Elle était de

$1{,}1 \times 10^{-10}$ ampères à — 28° C. Pour le gain et la sensibilité de la photo-cathode observés, un courant de sortie égal à ce courant résiduel serait obtenu par une lumière de 2×10^{-11} lumens.

V. CONCLUSIONS

Les conclusions principales de ce travail peuvent être résumées comme suit:

1. L'élaboration de plusieurs méthodes expérimentales permet de résoudre aisément et rapidement des problèmes compliqués relatifs aux trajectoires électroniques dans des champs électrostatiques. Grâce à ces méthodes, on a réussi à réaliser un multiplicateur électrostatique satisfaisant à toutes les conditions qui dépendent de la disposition et de la forme des électrodes.

2. Les causes du courant résiduel ont été découvertes. Elles sont:

a) les fuites ohmiques du circuit du collecteur;
b) l'effet de l'ionisation de l'atmosphère gazeuse du tube;
c) l'émission froide provenant des conducteurs contenus dans le tube;
d) l'émission thermique des électrodes émettrices.

On a imaginé les moyens de supprimer complètement les contributions des causes *a*) et *b*) et de supprimer dans la plupart des cas celle de la cause *c*). Toutefois, en dépit de toutes les précautions prises, dans quelques tubes le courant résiduel provenait encore, en grande partie, de l'émission froide.

3. La nature fondamentale de la contribution au courant résiduel de l'émission thermique étant reconnue, le multiplicateur a pu servir à la détermination des constantes thermiques de deux surfaces photo-émettrices d'oxyde d'argent traité par des métaux alcalins. Pour la surface traitée au caesium, on trouve un travail de sortie de 0,75 volts ($\pm$ 0,05 volt) et une constante A de $s \times 2{,}5 \times 10^{-7}$ amp/cm^2 deg^2 ($0{,}1 < s < 10$).

Pour la surface traitée au rubidium, le résultat, malheureusement moins bien fondé, a été que le travail de sortie était de 1 volt et la constante A de l'ordre de 10^{-8} amp/cm^2 deg^2.

4. Dans les meilleurs tubes obtenus, l'intensité de la lumière qui produit un courant de sortie égal au courant résiduel était égale à $2{,}5 \times 10^{-11}$ lumens à — 28° C.

Il est donc possible de construire un multiplicateur photo-électrique à concentration purement électrostatique d'une sensibilité donnée aussi grande que l'on veut et dont le courant résiduel ne dépend que de l'émission thermique de la photo-cathode (puisque l'émission thermique des électrodes en alliage est négligeable). Par conséquent, le rapport des émissions thermiques à l'émission photo-électrique déterminée égale la capacité du multiplicateur à mesurer des lumières faibles et constantes. Pour d'autres surfaces que celles traitées par un métal alcalin, ce rapport caractéristique peut être plus petit. Cela est le cas, par exemple, pour une surface récemment décrite [26] d'un alliage de caesium et de bismuth évaporé sur de l'argent.

Grâce à la réduction du courant résiduel, le facteur décisif intervenant dans les applications du multiplicateur dans le domaine de l'effet des lumières de faible intensité est, en pratique, le souffle ou le « shot effect » du courant photo-électrique. C'est le cas même si l'emploi des surfaces alcalines est conservé et que le courant résiduel d'origine thermique n'est pas aussi petit qu'il pourrait l'être avec une surface photo-émissive à caractéristiques plus favorables. Il est facile de s'en rendre compte en considérant que dans un multiplicateur dont la photo-sensibilité (10 μA par lumen) et le gain (600.000) ne sont que passables, la valeur la plus petite du courant résiduel (9×10^{-11} amp) observée à la température de — 28° C. correspond à une émission originelle de la photo-cathode d'environ 1000 électrons par seconde.

Un refroidissement convenable des surfaces alcalines ou l'emploi éventuel d'une autre surface photo-émettrice suffit donc à réduire le courant résiduel jusqu'à un degré où il n'est plus le facteur décisif pour la possibilité d'emploi du multiplicateur à

opérer avec de petites intensités de lumière. Le « shot effect » devenant alors ce facteur décisif, il n'est plus possible d'apporter une amélioration nouvelle à l'appareil puisque ce phénomène dépend de la nature même de l'électricité qui est corpusculaire.

VI. RÉFÉRENCES

[1] Il n'est pas possible de donner ici une bibliographie complète de tous les travaux concernant l'émission secondaire. On peut en trouver une, et un excellent résumé du sujet, par R. KOLLATH, *Physikalische Zeitschrift*, vol. 138, nº 7, p. 202-204. 1937.

[2] Des brevets de multiplicateurs d'électrons ont été pris déjà en 1919. Parmi les premiers inventeurs on peut citer: Slepien, Jarvis, Blair, Iams et Farnsworth.

[3] « Television by Electron Image Scanning ». *Journal of the Franklin Institute*, vol. 218. Oct. 1934, p. 441-444, par P. T. FARNSWORTH.

[4] « The secondary emission electron multiplier », par Dr V. K. ZWORYKIN, Dr G. A. MORTON et L. MALTER. *Institute of Radio Engineers*, vol. 24, nº 3. Mars 1936.

[5] « The electrostatic electron multiplier », par Dr V. K. ZWORYKIN et Jan RAJCHMAN. *Proc. of the Institute of Radio Engineers* (1938).

[6] « A Theory of Noise for Electron Multipliers », par W. SHOCKLEY et J. R. PIERCE. *Proc. Institute of Radio Engineers*, vol. 26, nº 3. Mars 1938.

[7] Un multiplicateur a été utilisé dans ce laboratoire pour un photospectromètre-enregistreur pour corps luminescents à rayons cathodiques. Cet appareil sera décrit bientôt dans *The Review of Scientific Instruments* par Dr V. K. ZWORYKIN sous le titre « An Automatic Recording Spectrophotometer for Cathode-luminescent Materials ». Un multiplicateur photo-électrique construit dans ce laboratoire est en usage dans le département de spectroscopie du « Massachusetts Institute of Technology » dirigé par le Prof. G. R. Harrison.

[8] Un multiplicateur photo-électrique construit dans ce laboratoire est en usage à l'observatoire du « California Institute of Technology » à Pasadena, California.

[9] *Geometrische Elektronenoptik*, par E. BRÜCHE et O. SCHERZER. Julius Springer, 1934.

[10] « Mechanical Tracer for Electron Trajectories », par D. GABOR. *Nature*, p. 373, vol. 139, 27, février 1937.

[11] Résultats inédits de D. Langmuir, de la « R.C.A. Radiotron Co. » de Harrison, N.-J.

[12] *Electronics*, par Dr H. SALLINGER, de la « Farnsworth Co. ». Oct. 1937, p. 50.

[13] « The motion of an electron in a two-dimensional electrostatic field », par P. H. J. KLEYNEN. *Philips Technical Review*, vol. 12, nº 11, p. 321-352. Nov. 1937.

[14] M. L. R. Snyder, de notre laboratoire, contribua énormément à la réalisation de cet appareil.

[15] Les types A, B, C, D sont en instance de brevet (U.S. patents).

[16] Les calculs ont été faits par le Dr E. G. Ramberg, de notre laboratoire.

[17] Le Dr E. W. Pike, de notre laboratoire, aida à réaliser ces flans.

[18] Ce régulateur fut conçu par M. A. W. Vance, de notre laboratoire.

[19] « A vacuum tube microammeter », par A. W. VANCE. *Review of Scientific Instruments*, déc. 1936, vol. 7, p. 49.

[20] Tiré d'un travail inédit du Dr E. R. Piore.

[21] Voir, par exemple, DE BOER, *Emission and Absorption Phenomena.*

[22] Voir, par exemple, *Photocells and Their Applications*, par Dr V. K. ZWORYKIN et Dr E. D. WILSON (1934). Ed. John Wiley & Sons, Inc., New-York.

[23] Cet expédient est l'idée de M. L. E. Flory, de notre laboratoire.

[24] Cette description sera publiée par le Dr V. K. Zworykin, M. H. W. Leverenz et le Dr J. Ruedy, de notre laboratoire.

[25] Tiré d'un travail inédit de M. R. L. Snyder.

[26] GÖRLICH und SAUR, *Zeit. f. Instrumentenkunde*, LVI, p. 423 (1936).