Le courant résiduel dans les multiplicateurs d'électrons électrostatiques

Autor(en): **Rajchman, Jan**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Archives des sciences physiques et naturelles**

Band (Jahr): **20 (1938)**

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-742943

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

LE COURANT RÉSIDUEL

DANS LES MULTIPLICATEURS D'ÉLECTRONS ÉLECTROSTATIQUES

PAR

Jan RAJCHMAN

(Avec 28 fig.)

(suite)

IV. LE COURANT RÉSIDUEL

1. Introduction.

Dans tout multiplicateur d'électrons dans lequel le courant électronique originel est dû à la photo-émission, un courant résiduel de sortie est observé dans le circuit du collecteur lorsque le tube se trouve dans l'obscurité totale, c'est-à-dire lorsqu'il est protégé complètement contre toute radiation lumineuse (de l'infra-rouge à l'ultra-violet). Ce courant résiduel de sortie sera appelé dorénavant le « courant résiduel » ou parfois le « courant sombre » (the dark current, der Dunkelstrom).

Ainsi qu'il a été expliqué dans l'introduction, le courant résiduel est tout à fait indésirable. Son existence est un obstacle sérieux à l'application du multiplicateur aux domaines dans lesquelles il doit faire concurrence à d'autres appareils, tels, par exemple, que des cellules photo-électriques suivies d'un amplificateur à lampes, et limite essentiellement son application

dans les domaines scientifiques tels que la spectroscopie ou l'astronomie.

Le but du présent travail est de découvrir et analyser les causes du courant résiduel et de préconiser les moyens de le réduire.

Les quatre causes suivantes ont été découvertes:

1° Le courant de fuite ohmique s'écoulant entre le circuit du collecteur et celui de n'importe quelle autre électrode;

2° Les effets que produisent les ions positifs résultant de l'ionisation du gaz resté dans le tube;

3° L'émission froide des électrodes et de leur connection qui est provoquée par le champ électrostatique;

4° L'émission thermique des surfaces émissives, secondaire et photo-électrique.

Toutes les observations faites peuvent être expliquées par ces quatre phénomènes. Il n'y a ainsi aucune donnée expérimentale pour supposer d'autres causes au courant résiduel. Cependant, si ces causes prédominantes étaient complètement supprimées, il est probable qu'un courant résiduel resterait encore. Il pourrait être dû à la radio-activité des parois de verre, aux radiations cosmiques, aux rayons X mous résultant du bombardement électronique des électrodes ou à toute autre cause.

A l'exception des fuites ohmiques, les facteurs contribuant au courant résiduel sont décrits dans l'ordre chronologique de leur analyse, qui coïncide avec l'ordre de leur importance relative.

2. Les fuites ohmiques.

Les pertes ohmiques entre le collecteur et une électrode quelconque, ou entre leurs fils de connection respectifs, est la cause la plus évidente, mais non pas la plus importante, du courant résiduel. Elle est traitée en premier lieu, parce que des précautions relativement simples pour la rendre négligeable furent prises au cours de tout ce travail.

L'isolement nécessaire peut être estimé en anticipant sur les valeurs du courant résiduel les plus petites qui peuvent être obtenues lorsque toutes les autres causes du courant résiduel ont été réduites au minimum. Elles sont de l'ordre de 10^{-10} ampères. Puisque la tension totale appliquée au multiplicateur varie entre 2000 et 3000 volts, la résistance de l'isolement doit être de l'ordre de 10^{13} ohms.

Les fuites extérieures au multiplicateur peuvent être mesurées en déconnectant, dans le voisinage du tube, le conducteur du collecteur sans déranger par ailleurs le reste de l'appareillage. Lorsque l'on se sert de fils isolés par une couche de caoutchouc très épaisse (supportant une tension nominale de 10.000 volts) et que le multiplicateur soit tenu dans une boîte dont l'atmosphère est desséchée par un agent convenable tel que le chlorure de calcium, les pertes ohmiques externes deviennent négligeables. On doit aussi prendre soin d'isoler convenablement le microampèremètre du circuit de sortie.

Les pertes ohmiques internes peuvent être distinguées des autres causes du courant résiduel de plusieurs manières différentes. Le processus de multiplication peut être détruit en déconnectant une ou plusieurs électrodes multiplicatrices. Le courant résiduel qui existe alors ne peut pas être dû à un bombardement électronique du collecteur et doit par conséquent provenir d'une conductibilité ohmique directe. Une autre méthode consiste à mesurer le courant résiduel en fonction de la tension appliquée au tube. Puisque le coefficient de l'émission secondaire varie linéairement en fonction du potentiel pour les tensions utilisées, le gain total variera suivant une puissance de ce potentiel. Ainsi qu'il sera montré, le courant résiduel provenant des autres causes est proportionnel au gain total et par conséquent varie suivant la même loi de puissance du potentiel. La conductibilité électrique est, par contre, proportionnelle à la tension appliquée. En particulier, il est bien évident que s'il existe un courant résiduel pour une tension très basse, telle que 10 ou 15 volts par étage multiplicateur, les fuites ohmiques doivent prédominer, puisque le gain total est plus petit que 1 et toutes les autres causes du courant résiduel sont pratiquement inexistantes.

Au début de ce travail toutes les surfaces émettrices étaient d'oxyde d'argent traité par un métal alcalin tel que le caesium ou le rubidium. Ce métal alcalin, ayant une tension de vapeur élevée, peut se condenser facilement sur les supports des électrodes et créer ainsi une sérieuse diminution de l'isolement. Les fuites ohmiques entre les diverses électrodes autres que le collecteur n'augmentent pas le courant résiduel et sont inoffensives, puisque le potentiel des électrodes est maintenu par des moyens extérieurs appropriés. Cependant, si ces fuites sont très grandes, il devient impossible de mesurer les courants électroniques émis aux diverses électrodes, en particulier à la photo-cathode. Cela était le cas lorsque les supports des électrodes étaient en mica, parce que le métal alcalin qui pénètre entre les couches de clivage du mica augmente de beaucoup sa conductibilité. C'est pourquoi l'usage pratique de ce corps dut être abandonné en faveur du verre avec lequel la construction est plus délicate. Le verre procure un isolement suffisant pour toutes les électrodes, excepté le collecteur.

Le collecteur est supporté directement par son fil conducteur scellé dans l'enveloppe du tube et il n'est en contact avec aucun autre corps. Le seul chemin restant pour les courants de fuite est à la surface de verre du pied du tube, entre le fil connectant le collecteur et ses voisins. Ce chemin de fuite peut être allongé en scellant un petit tube en verre au pied du fil du collecteur. Cette précaution fut tout à fait suffisante pour rendre les fuites ohmiques négligeables, même lorsqu'un excès de métal alcalin était resté dans le multiplicateur. Il n'a pas été nécessaire de recourir aux « anneaux de protection » bien connus.

Ces précautions très simples relatives à l'isolement du collecteur furent adoptées dans le cours de ce travail tout entier, même vers sa fin, lorsque l'usage du métal alcalin était strictement localisé au traitement de la photo-cathode. Les supports en mica furent utilisés à nouveau, mais leur contact avec le collecteur ou son fil de connection fut soigneusement évité.

3. L'effet des ions.

a) *Introduction.*

Ainsi qu'il a été dit plus haut, l'étude systématique des trajectoires d'électrons dans les cellules élémentaires a fourni le dessin du multiplicateur du type B (fig. 6). Les résultats prévus par cette étude, quant aux propriétés de concentration, furent entièrement confirmés par l'expérience.

Le premier tube de ce type était à 10 étages multiplicateurs. Ce nombre fut choisi, parce que l'on avait cru qu'un défaut

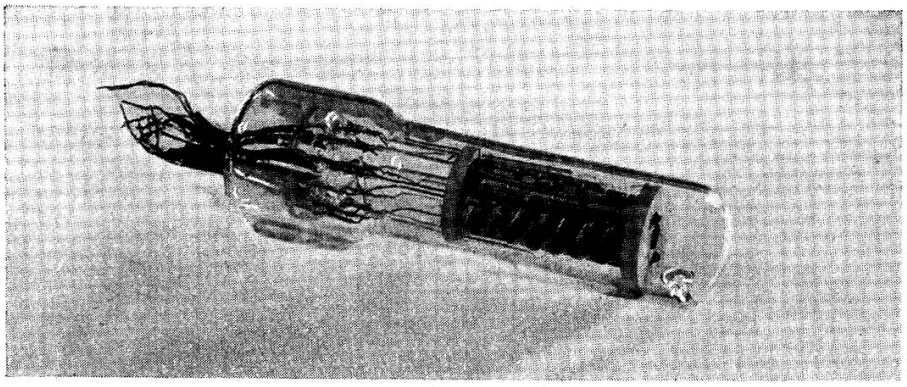

Fig. 12.

Multiplicateur à 10 étages du type B.

éventuel de la concentration n'aurait pas été détecté dans un multiplicateur avec moins d'étages. Les électrodes en nickel argenté électrolytiquement étaient montées sur des supports en lavite et étaient activées par l'oxygène et du caesium de la manière habituelle (fig. 12). Le processus de multiplication a été trouvé en parfait accord avec les prédictions, car aucune déconcentration ne put être observée aux faibles tensions. Malheureusement, pour une tension suffisante, le courant résiduel était énorme et pouvait atteindre jusqu'à 6 mA. Un état pouvait même être établi dans lequel le gain, mesuré comme le quotient des augmentations des courants de sortie et de la photo-cathode provoquées par une lumière excitatrice,

diminuait lorsque la tension augmentait. Cela est causé par l'effet de déconcentration dû aux charges spatiales produites par l'intense courant résiduel.

Une réduction radicale du courant résiduel devint absolument indispensable, à ce point des recherches, non seulement pour permettre l'emploi du multiplicateur pour la mesure d'intensités de lumières très faibles, mais aussi à d'autres applications. La source des difficultés fut trouvée dans l'ionisation du gaz présent dans le tube.

L'explication du phénomène en jeu sera esquissée, puis les données expérimentales qui confirment les spéculations seront exposées et enfin les méthodes utilisées pour supprimer les effets indésirables des ions seront décrites.

b) *Théorie.*

Les courants électroniques intenses présents dans les derniers étages de multiplication ionisent le gaz résiduel. Les ions positifs ainsi produits se trouvent dans un champ qui est à peu près parallèle aux rangées des électrodes, et sont par conséquent contraints à se mouvoir vers la photo-cathode. Ils bombardent une des électrodes multiplicatrices initiales, ou la photo-cathode elle-même, avec une énergie cinétique acquise par la perte de leur énergie potentielle, ce qui correspond à une grande fraction de la tension totale appliquée au tube. Le choc de ces ions à la surface des électrodes bombardées produit des électrons secondaires. Ces électrons, s'ils sont libérés à un endroit convenable de l'électrode bombardée ou bien s'ils ont acquis une vitesse initiale suffisante pour vaincre l'effet d'un champ adverse, seront multipliés par le processus de multiplication normalement établi pour les photo-électrons. Le courant électronique multiplié qui en résultera, produira de nouveaux ions positifs qui, à leur tour, vont libérer de nouveaux électrons secondaires. Ce mécanisme régénérateur peut se maintenir de lui-même ou bien il augmente simplement le gain effectif du multiplicateur. Dans le premier cas, le courant de sortie, c'est-à-dire le courant résiduel, qui est amorcé par des électrons émis thermiquement ou « par acci-

dent », sera limité par les effets des charges spatiales et, par conséquent, deviendra très grand. La figure 13 illustre un schéma de ce mécanisme régénérateur; les lignes grasses représentent les trajectoires des électrons et les lignes pointillées symbolisent celles des ions. Ce processus régénérateur, quelque peu similaire à celui qui a lieu dans les cellules photo-électriques à gaz, ne devient un phénomène observable dans ces tubes à vide très poussé, que grâce à l'énorme multiplication du courant électronique qui, en un sens, compense l'inefficacité de la production des ions et de la régénération des électrons.

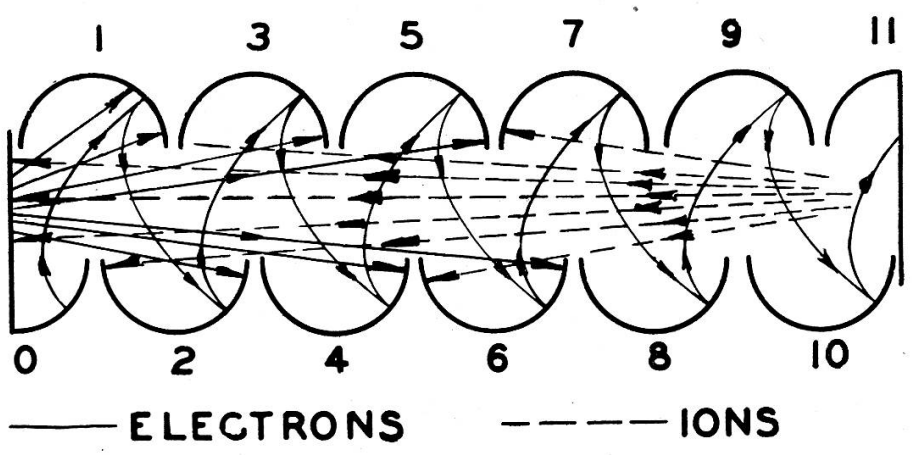

Fig. 13.

La réaction ionique.

Considérons maintenant les choses d'une façon quelque peu plus détaillée. D'abord, pour simplifier, nous admettrons que tous les ions produits près du collecteur le sont par le courant électronique final I et que les électrons secondaires qui résultent du bombardement ionique ont leur origine à la photo-cathode. Cette hypothèse réduit à un mécanisme régénérateur unique la réalité complexe des électrons secondaires libérés à chaque électrode par des ions provenant de tous les étages qui la suivent.

Cela revient à remplacer la somme d'une série géométrique par son premier terme ce qui est parfaitement justifié, si l'on se sert dans ce qui suit de coefficients « réduits » appropriés.

Supposons maintenant que le courant électronique final I produise un courant ionique αI s'écoulant vers les électrodes les plus négatives. Une fraction $\beta\alpha I$ seulement de ce courant ionique αI atteindra réellement la photo-cathode. Si δ est le quotient du courant électronique secondaire au courant ionique primaire, un courant électronique secondaire $\delta\beta\alpha I$ sera libéré à la photo-cathode. Une partie seulement $\gamma\delta\beta\alpha I$ des électrons libérés sera vraiment multipliée. Les coefficients réduits β et γ tiennent compte de la complexité de la distribution et de l'efficacité des ions et des électrons qui sont produits aux divers étages. Le coefficient α mesure l'efficacité de l'ionisation tandis que le coefficient δ mesure celle de l'émission électronique par le bombardement des ions. Il résulte de ces considérations que le courant électronique total i libéré à la photo-cathode est composé du courant originel i_0 dû à l'émission photo-électrique, thermique ou toute autre et du courant additionnel $\gamma\delta\beta\alpha I$ dû à la réaction des ions. Nous avons ainsi la relation

$$i = i_0 + \lambda I \tag{35}$$

dans laquelle

$$\lambda = \alpha\beta\gamma\delta \ . \tag{36}$$

Le gain G du multiplicateur est, par définition, le quotient du courant de sortie au courant émis à la photo-cathode, c'est-à-dire que:

$$I = Gi \ . \tag{37}$$

La combinaison des équations (35) et (37) fournit la relation

$$I = \frac{G}{1 - \lambda G} i_0 = G' i_0 \ . \tag{38}$$

On voit ainsi que la réaction ionique augmente le gain effectif de G à G'. Pour établir l'équation (38) nous avions admis que le coefficient λ était constant, c'est-à-dire qu'il était indépendant de I. Cela cesse d'être vrai pour des courants très forts, parce qu'alors les charges spatiales altèrent complètement le champ et changent toutes les conditions. Lorsque les coefficients λ et G sont tels que $\lambda G = 1$, cela signifie simplement que

la relation (38) d'après laquelle G′ serait infini, n'est pas valable et que l'on a à faire en réalité à un état stationnaire maintenu par la régénération et limité par les charges spatiales. Dans ce cas, un électron thermique ou « accidentel » suffira pour amorcer un courant résiduel très grand. Analysons maintenant la validité de l'explication ci-dessus en considérant successivement l'ordre de grandeur des divers phénomènes en jeu.

Les tubes sont vidés au moyen d'une pompe de diffusion à mercure, à deux étages, et d'une pompe mécanique préliminaire. Une trappe à air liquide assure la condensation des vapeurs de mercure et autres. La pratique habituelle consiste à chauffer le tube dans un four pendant 3 à 4 heures à 475-500° C et à chauffer ensuite les parties métalliques par induction jusqu'à ce qu'aucune augmentation de pression ne résulte d'une prolongation de la chauffe. Ensuite les surfaces émettrices sont traitées d'une façon convenable. La pression est mesurée avec une jauge à ionisation qui est calibrée au moyen d'une jauge de McLeod. La pression dans les tubes au moment où ils sont scellés, devient de l'ordre de 10^{-6} mm de Hg.

Il est difficile de calculer le coefficient α, c'est-à-dire le courant ionique auquel on doit s'attendre au dernier étage multiplicateur pour un courant électronique I donné. Tout d'abord la nature et la pression de l'atmosphère gazeuse du tube ne sont pas bien connues. D'autre part la disposition compliquée des électrodes et le champ potentiel non uniforme qui en résulte, rendraient les calculs encore plus difficiles. Cependant le coefficient α peut être estimé directement en se basant sur les indications de la jauge à ionisation. En dépit du fait que les dispositions des électrodes et des potentiels des électrodes du multiplicateur et de la jauge à ionisation sont complètement différentes, l'on peut néanmoins raisonnablement admettre que l'ionisation est du même ordre de grandeur dans les deux cas. C'est ainsi que, à partir des courants de grille et de plaque de la jauge à ionisation, le coefficient α a été estimé à 10^{-4}.

On peut se faire une idée des trajectoires des ions produits dans l'espace entre les électrodes du dernier étage multiplicateur par une inspection de la figure 7. On peut, en effet, observer qu'en moyenne, les surfaces équipotentielles sont perpendi-

culaires aux rangées des électrodes et que, par conséquent, un ion dont un point tel que A est l'origine, décrira une trajectoire ressemblant à une sinusoïde amortie et viendra heurter le terminateur de la photo-cathode. L'énergie de l'impact correspond à la tension totale appliquée au tube et sera donc de l'ordre de 1500 à 3500 électrons-volts. Des expériences faites sur le modèle mécanique dont les cylindres les plus hauts correspondaient aux électrodes les plus positives, montrèrent bien les trajectoires attendues. Cependant, elles indiquèrent aussi que, suivant la position du point A et suivant la vitesse initiale de l'ion, certains ions ne réussissent pas à parvenir jusqu'à la photo-cathode et sont collectés par quelque autre électrode. Le quotient des ions effectifs aux ions produits, le coefficient β, peut être estimé ainsi à 10^{-1} ce qui n'est sûrement pas une valeur exagérée. Un raisonnement quelque peu analogue peut être tenu pour les électrons secondaires libérés à la photo-cathode et l'on peut bien admettre que le coefficient γ est aussi égal à 10^{-1}. Si nous admettons que le coefficient δ de l'émission secondaire par ions est égal à 1, il résulte des estimations des coefficients β et γ que chaque 100 ions positifs produits près du collecteur donnent naissance sur la photo-cathode à un seul électron secondaire effectivement multiplié.

Des mesures du coefficient δ de l'émission secondaire par ions positifs furent faites dans ce laboratoire [20] en utilisant une cible d'oxyde d'argent traité au caesium et des ions de Li comme projectiles. Le coefficient δ variait entre 0,5 et 2,0 pour des voltages primaires de 500 à 2000 volts. Par conséquent, nous pouvons bien admettre, dans nos considérations approximatives, que le coefficient δ est égal à l'unité.

En introduisant les valeurs estimées des coefficients α, β, γ et δ dans la relation (36), le coefficient de réaction ionique λ devient:

$$\lambda = \alpha\beta\gamma\delta = 10^{-4} \times 10^{-1} \times 10^{-1} \times 10^{0} = 10^{-6} \cdot$$

Si le gain G du multiplicateur est 10^6 ainsi qu'il le devient facilement dans un tube à 10 étages multipliant chacun 4 fois, le produit λG est égal à l'unité et l'on doit s'attendre à un très grand courant (résiduel) de sortie stationnaire. Les ordres de

grandeur des divers coefficients furent estimés simplement pour montrer que l'effet de la réaction ionique, dont on observe les effets, est une hypothèse raisonnable.

Le mécanisme de la réaction ionique est assez compliqué et une étude beaucoup plus approfondie de tous les phénomènes en jeu serait nécessaire pour le bien comprendre. Cependant, la simple analyse qui vient d'être esquissée et dont la validité est confirmée par les expériences décrites plus bas, nous a permis d'atteindre notre but immédiat, c'est-à-dire de réduire la réaction ionique jusqu'au point où sa contribution au courant résiduel n'est plus mesurable. Cependant, il se peut parfaitement que la réaction ionique puisse devenir très utile, si l'on apprend à la contrôler convenablement. On peut s'en servir simplement pour augmenter le gain effectif ou par exemple pour créer une source d'électrons à la cathode. Si cette source est modulée, le multiplicateur peut devenir un tube amplificateur ou oscillateur sans posséder pour cela de cathode thermique. Des applications de ce genre ne semblent pas, cependant, être très pratiques parce qu'il est très difficile de contrôler et de stabiliser la réaction ionique qui dépend de beaucoup de facteurs critiques, dont en particulier la pression de l'atmosphère du tube. L'inertie des ions constituerait aussi un obstacle, si l'on désire que le tube opère à de très hautes fréquences.

c) *Les données expérimentales.*

La validité de l'explication ci-dessus, à laquelle il vient d'être donné une justification théorique, peut être confirmée par les deux groupes d'expériences suivantes:

1. Les résultats des mesures obtenues avec le multiplicateur mentionné au paragraphe *a*) sont donnés par les courbes des figures 14, 15, 16 et 17. Ce tube du type B possédait 10 électrodes multiplicatrices maintenues à des potentiels proportionnels à leur numéro d'ordre (voir fig. 6).

Les courbes de la figure 14 représentent le courant résiduel (B) et le courant de sortie (A) (c'est-à-dire l'augmentation du courant dans le circuit du collecteur provoquée par l'illumination de la photo-cathode) en fonction de la tension par étage. Il en ressort

clairement qu'à 120 volts par étage le courant résiduel devient si grand que les charges spatiales produisent une déconcentration suffisante pour créer la condition paradoxale dans laquelle le gain diminue lorsque la tension augmente. Les valeurs énormes du courant résiduel sont dignes d'être remarquées tout particulièrement.

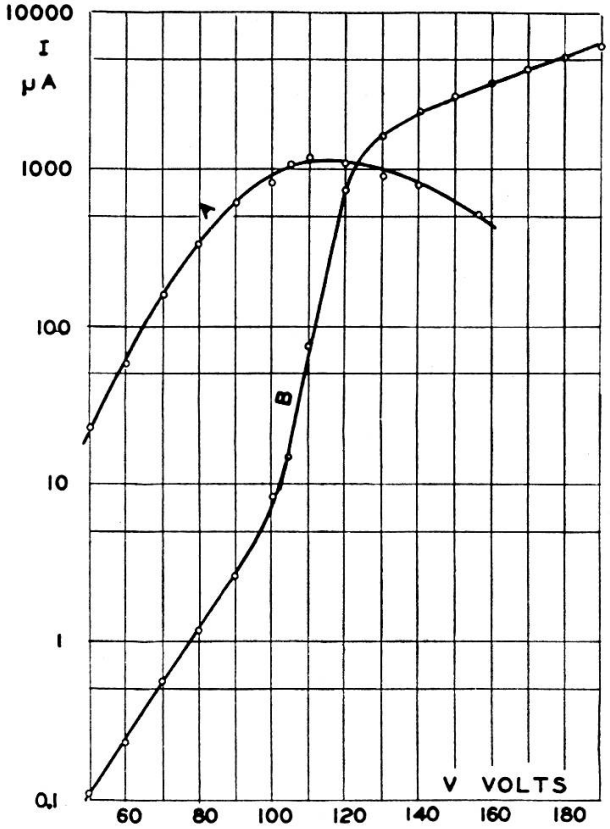

Fig. 14.

Courant de sortie en fonction de la tension par étage.
A Courant de sortie utile dû à l'éclairement.
B Courant résiduel.

La courbe de la figure 15 représente le changement i du courant de la photo-cathode que provoque une illumination constante de celle-ci, en fonction de la tension, lorsque le multiplicateur tout entier est en opération. Si toutes les électrodes, excepté la photo-cathode et la première électrode multiplicatrice, sont déconnectées, il reste simplement une cellule photo-cathode à vide poussé et le courant d'émission

atteint une valeur saturée i_0 indiquée sur la figure 15. La différence entre le courant mesuré et le courant saturé est la contribution de la réaction ionique. Cette différence atteint un maximum pour la même tension (120 volts) que le courant de sortie utile.

Il est particulièrement significatif de représenter l'augmentation i du courant de la photo-cathode que provoque une illumination constante en fonction du courant de sortie I, ce dernier étant varié par le changement de la tension. Cela a été fait sur la figure 16. On trouve une dépendance linéaire presque parfaite qui peut s'exprimer par la relation:

$$i = i_0 + a\mathrm{I} \tag{39}$$

dans laquelle a est une constante égale à $7{,}8 \times 10^{-6}$ dans ce cas. Cette relation ressemble à celle (35) qui fut déduite théoriquement et confirme ainsi les hypothèses faites.

Il est intéressant de considérer plus en détail la similitude des relations (39) et (35). Le courant de sortie I est varié, dans les expériences, en changeant la tension, ce qui strictement parlant, altère l'ionisation (coefficient α) et le bombardement ionique (coefficient δ), et par conséquent on ne devrait pas s'attendre à une variation linéaire du courant de la photo-cathode en fonction du courant de sortie. Cependant, comme de très petites variations de tension suffisent pour la variation du courant de sortie dont on se sert pour la courbe, elles ne produisent pas une altération substantielle du mécanisme de la réaction, puisque l'ionisation du gaz et l'émission secondaire par ions ne varient toutes deux que de très peu aux tensions utilisées. C'est ainsi que la dépendance linéaire est préservée.

Il faut remarquer, de plus, que le coefficient λ de la relation (35) et le coefficient a de la relation (39) n'ont pas exactement la même signification. Les ions positifs arrivant et les électrons secondaires partant sont des courants de la photo-cathode s'écoulant dans le même sens, ce qui rend le courant mesuré i plus grand que le courant électronique réel émis à la photo-cathode. Ce courant électronique serait donné par la relation

$$i = i_0 + a\left(\frac{\delta}{\delta + 1}\right)\mathrm{I} \ . \tag{40}$$

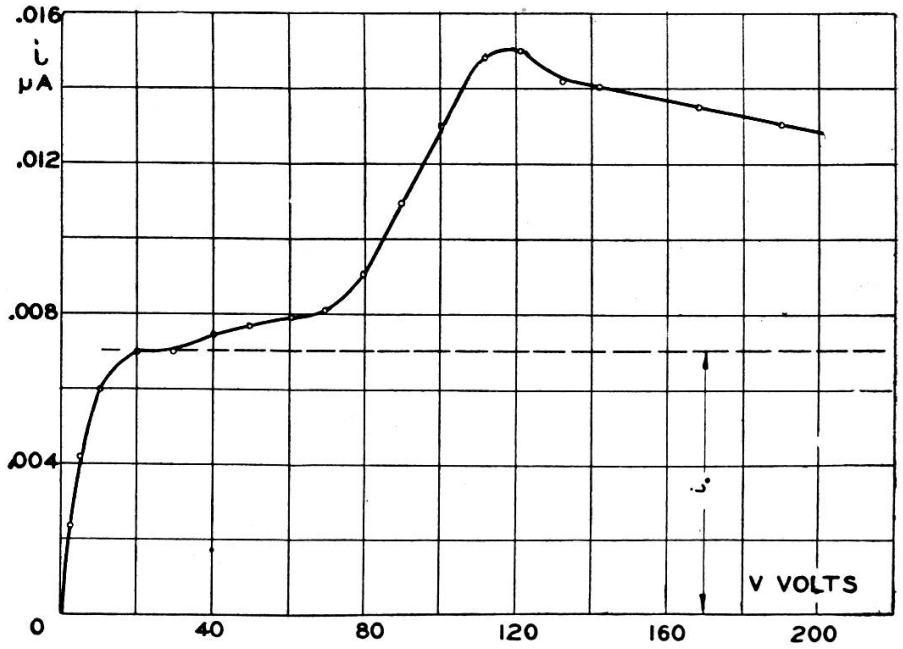

Fig. 15.

Courant de la photo-cathode en fonction du courant de sortie.

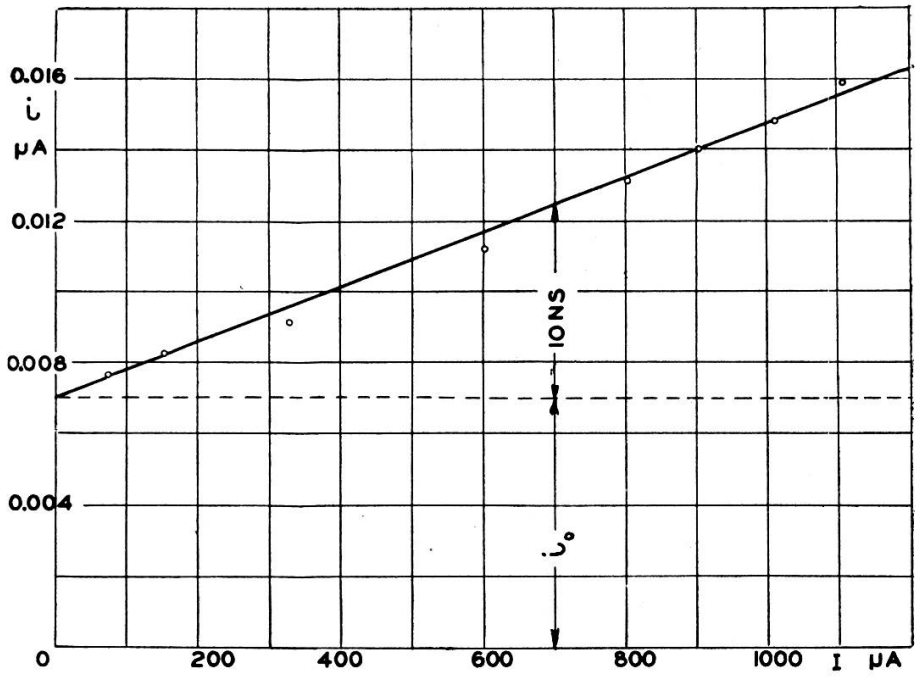

Fig. 16.

Courant de la photo-cathode en fonction du courant de sortie.
Courbe de réaction ionique. Type B.

D'autre part, il faut remarquer aussi que le coefficient λ est « réduit », c'est-à-dire qu'il a une valeur telle que l'effet composé de toutes les réactions ioniques partielles qui ont lieu de toutes les manières possibles entre les diverses électrodes, est similaire à celui d'une réaction idéale unique prenant place entre le collecteur et la photo-cathode. Par conséquent, il doit avoir une valeur beaucoup plus grande que celle qu'il aurait s'il correspondait seulement au courant réel émis à la photo-

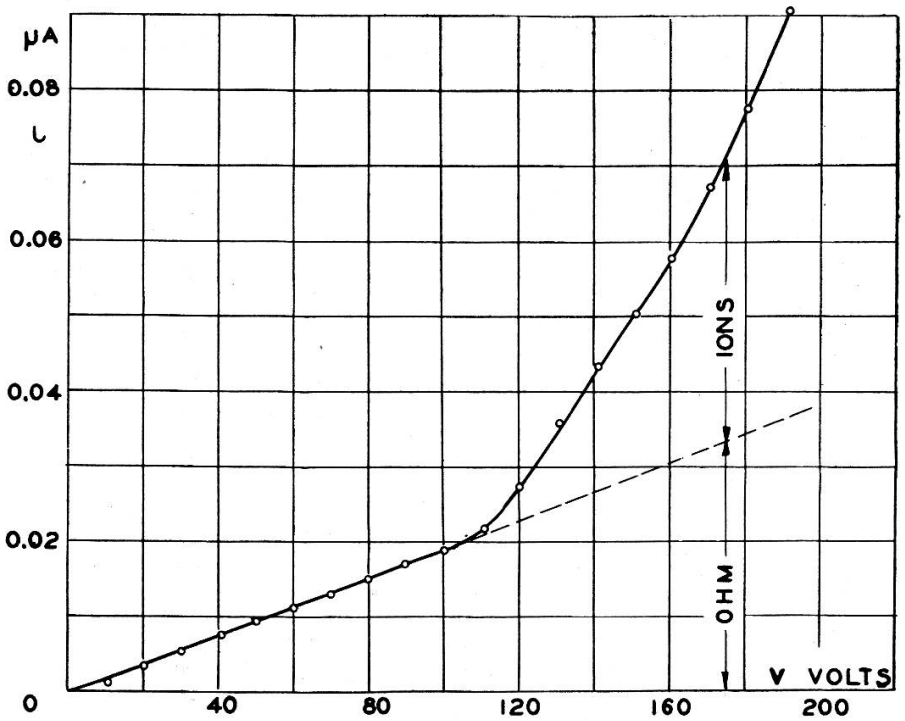

Fig 17.

Courant résiduel en fonction de la tension par étage (type B).

cathode. Ces deux différences entre a et λ rendent difficile une comparaison directe entre ces deux coefficients.

Il ne faut pas chercher dans les mesures ci-dessus une confirmation numérique de la théorie, mais plutôt une confirmation expérimentale de l'existence de la réaction ionique. Son existence est symbolisée par l'équation (39) dans laquelle le coefficient a est d'un ordre de grandeur tout à fait raisonnable.

La courbe de la figure 17 représente le courant dans le circuit de la photo-cathode, lorsque le tube est dans l'osbcurité totale,

en fonction de la tension par étage. La partie de la courbe de 0 à 110 volts correspond simplement aux fuites ohmiques qui sont assez élevées parce qu'aucune précaution pour les réduire n'a été prise dans ce tube. La différence entre le courant total et ces fuites ohmiques est la contribution de la réaction ohmique. Si cette différence est l'ordonnée d'une courbe dont le courant résiduel est l'abscisse (ce dernier variant avec la tension), la courbe est une droite passant par l'origine. La constante a correspondante se trouve être égale à $8{,}8 \times 10^{-6}$, ce qui est presque la même valeur que celle obtenue en illuminant la photo-cathode.

Le coefficient a de « la courbe de réaction ionique », c'est-à-dire de la courbe représentant l'augmentation i du courant de la photo-cathode en fonction de la tension par étage, est la même pour toutes les illuminations constantes de la photo-cathode, et même, comme il vient d'être indiqué, lorsque cette illumination est nulle. Ainsi ce coefficient a peut très bien être considéré comme une mesure de l'intensité de la réaction ionique puisqu'il ne dépend pas des conditions de l'opération du tube mais seulement de ses caractéristiques intrinsèques.

Plusieurs tubes du type B furent construits pour faire des mesures relatives aux propriétés de concentration. Nous n'indiquons pas ici les résultats obtenus puisque ce sujet fut déjà traité dans le chapitre précédent. Cependant il est intéressant de remarquer que des courbes de réaction ionique furent trouvées pour tous les tubes construits et que le coefficient a était toujours du même ordre de grandeur, c'est-à-dire 10^{-5}.

2. Une autre confirmation de l'existence de la réaction ionique fut obtenue comme suit:

Dans un multiplicateur du type B analogue à celui qui fut utilisé pour les expériences précédentes, la photo-cathode portait une grille qui constituait le terminateur nécessaire à la conservation de la nature cyclique du champ. Une plaque P activée comme les autres électrodes (c'est-à-dire recouverte d'oxyde d'argent traité au caesium) était montée derrière la grille terminatrice, ainsi qu'il est montré sur le schéma de la figure 18. Le courant résiduel I était mesuré en fonction de la différence

de potentiel V_0 entre la photo-cathode et la plaque P, pour différentes valeurs V de la tension par étage. Les courbes de la figure 19 montrent les résultats obtenus.

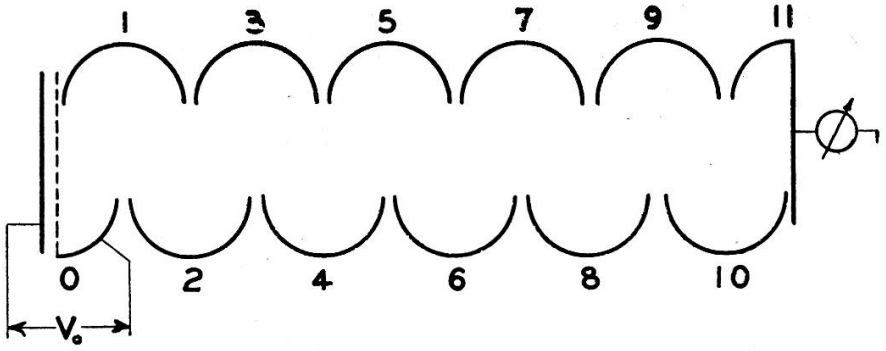

Fig. 18.

Tube vérifiant l'hypothèse de la réaction ionique.

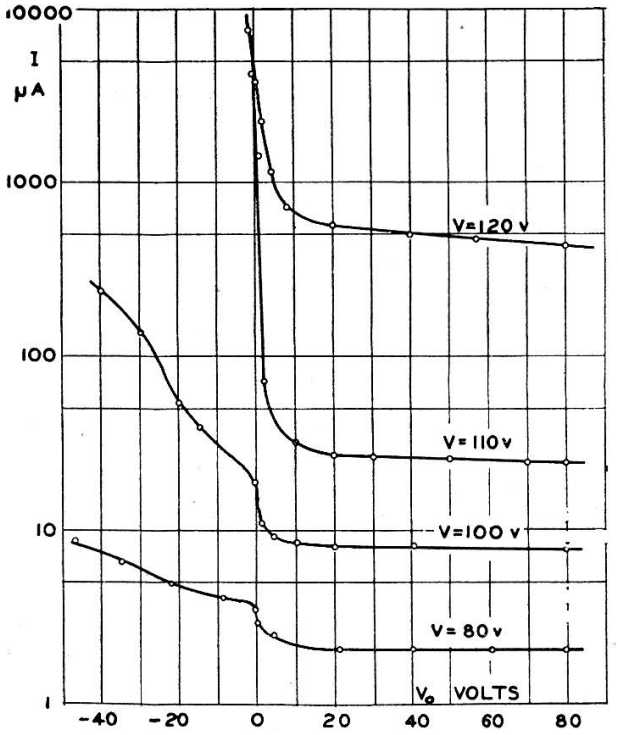

Fig. 19.

Courant résiduel en fonction du potentiel de la plaque P.

Une inspection de ces courbes montre que le courant résiduel est réduit par un très grand facteur (10 à 1000) lorsque le

potentiel de la plaque P est de quelques volts au-dessus de celui de la grille terminatrice. Cela provient de l'existence à la surface de la plaque P d'un champ qui s'oppose à la libération des électrons secondaires résultant du choc des ions passant par les trous de la grille. Comme une petite fraction seulement des électrons secondaires a une vitesse initiale suffisante pour surmonter cette barrière de potentiel de quelques volts, l'efficacité de la réaction ionique est considérablement réduite. Cela produit, à son tour, la diminution observée du courant résiduel.

Ce dispositif, quoiqu'il réduise énormément le courant résiduel, ne le supprime pas complètement. La réaction ionique a encore lieu entre les paires d'électrodes qui ne comprennent pas la photo-cathode, et est maintenue aussi par les ions qui heurtent les fils de la grille terminatrice. On avait espéré, tout d'abord, que ce dispositif serait suffisant, mais comme les expériences ont détruit cet espoir, on chercha un autre remède.

Avant d'aborder la description des moyens utilisés pour supprimer la réaction ionique, il est intéressant de mentionner, en passant, que le dispositif de la grille terminatrice permet de mesurer approximativement le coefficient δ des électrons secondaires aux ions primaires. Le courant de la plaque P est composé des ions arrivant et des électrons partant. En rendant la plaque P de quelques volts positive par rapport à la photo-cathode, le courant électronique est supprimé et il peut par conséquent être déterminé par la diminution résultante du courant total. Si, lorsque cela est fait, le courant de sortie I qui a changé à cause de la diminution de la réaction ionique, est maintenu constant par un réajustement approprié de la tension par étage V, le courant ionique qui bombarde la plaque P restera le même. L'expérience est faite de préférence en illuminant la photo-cathode de sorte que le réajustement de la tension soit aussi faible que possible. Le résultat, pour une cible d'oxyde d'argent traitée au caesium et bombardée probablement par des ions de caesium à 2000 volts fut $\delta = + 0{,}4$. Les erreurs présentes dans cette détermination sont très nombreuses et proviennent de toutes sortes de causes intempestives telles que l'effet des électrons secondaires pro-

duits sur les fils de la grille par le heurt des ions et collectés par la plaque P, ou l'émission photo-électrique de la plaque P. La valeur trouvée est probablement trop petite.

d) *L'élimination de la réaction ionique.*

Au lieu de supprimer la libération des électrons secondaires produits par le retour des ions, il est plus effectif d'annihiler la réaction ionique en empêchant ce retour lui-même. Cela fut réalisé en abandonnant le dessin du type B et en cherchant un type entièrement nouveau dans lequel la trajectoire d'un ion quelconque se termine dans l'étage même de son origine, pour qu'il lui soit impossible de produire de la réaction.

En plus d'être susceptible d'éliminer la réaction ionique, le nouveau type doit remplir les conditions déjà décrites concernant les propriétés de concentration et les champs collecteurs intenses. Le dessin d'un tel tube multiplicateur fut obtenu après une série de conceptions successives qui furent toutes examinées sur le modèle mécanique. La figure 6 C illustre le type obtenu. Les directrices des électrodes sont des arcs de cercle prolongés par des segments tangents. Les extrémités de ces tangentes sont des points équidistants sur une ligne droite. Il est clair qu'il est impossible de relier par une droite un point quelconque compris dans l'espace des derniers étages multiplicateurs à un point quelconque compris dans celui des étages initiaux, sans intercepter la plupart des électrodes.

Les excellentes propriétés de concentration de ce type furent déjà décrites. De plus, il fut facile de constater, avec l'aide du modèle mécanique, que la trajectoire d'un ion produit en un point quelconque se terminait réellement à l'électrode négative la plus proche. On peut d'ailleurs s'en rendre compte aisément par une inspection de la figure 8 qui représente les lignes équipotentielles et les trajectoires électroniques d'une cellule élémentaire de ce type C.

Le premier multiplicateur de ce type, à 10 étages, fut construit avec des dimensions plus grandes que d'habitude. Les électrodes étaient montées sur des plaques de verre tangentes aux rangées des électrodes de sorte que leurs extrémités

étaient restées libres. La figure 20 montre le tube qui a un diamètre de 9 cm et une longueur de 30 cm à peu près. La multiplication n'a rien laissé à désirer, comme il a déjà été dit. Cependant le courant résiduel, quoique considérablement réduit, était encore assez intense (300 μA pour un gain de 10^6). Décevante aussi, fut l'observation de la réaction ionique. Toutefois, une nouvelle propriété de celle-ci fut observée. La constante a de la réaction ionique était égale à 10^{-6}, lors-

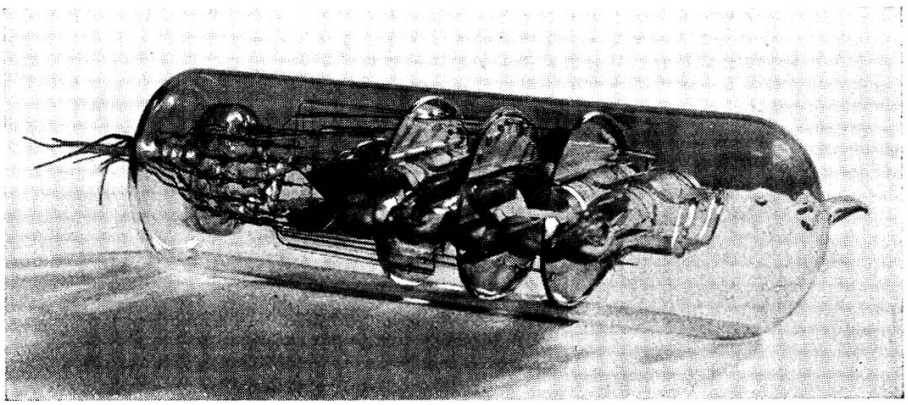

Fig. 20.

Multiplicateur à 10 étages du type C, avec écrans protecteurs.

qu'elle fut déterminée par la variation du courant de sortie résultant d'une illumination de la photo-cathode tandis que cette même constante a était égale à 10^{-5}, lorsqu'elle fut déterminée par la variation du courant résiduel. Quoique cette dernière détermination ait été assez délicate et n'ait probablement pas été très précise, les résultats obtenus n'en indiquent pas moins que la réaction ionique influence plus fortement le courant résiduel que le courant de sortie utile.

Le fait que la réaction ionique affecte le courant de sortie utile fut attribué aux ions qui s'échappent par les interstices compris entre les électrodes, aux endroits où celles-ci ne sont pas couvertes par les plaques de support qui étaient plus étroites que les électrodes. Ces ions étaient probablement collectés par le fil reliant la photo-cathode au pied du tube, car ce fil avait été laissé nu. Une certaine contribution à la

réaction ionique peut être due à des électrons s'échappant latéralement. Ces pertes sont spécialement accentuées aux grandes intensités de courant, ainsi que l'on peut en juger par la légère courbure positive de la courbe de réaction.

La prédominance de l'influence de la réaction ionique sur le courant résiduel peut être attribuée à un phénomène qui existe aux bords des électrodes. Si l'alignement de celles-ci n'est pas parfait, le retour des ions peut prendre place légèrement en dehors de la structure des électrodes et pourtant le mécanisme de multiplication électronique peut encore être possible aux bords mêmes des électrodes. Les densités des courants sont très fortes à cause des petites surfaces en jeu, de sorte que les charges spatiales qui en résultent, causent une déflection latérale des électrons. Si ceux-ci sont défléchis vers le milieu des électrodes, le retour des ions qu'ils produisent est impossible. Si, au contraire, les électrons sont défléchis vers l'extérieur, le mécanisme de multiplication est gêné. Il résulte de là qu'il s'établit un courant stationnaire aux bords des électrodes laissés libres, qui se maintient grâce au mécanisme habituel de la réaction ionique et qui est limité par les charges spatiales.

Il résulte de ces considérations que le courant résiduel serait considérablement réduit si l'on arrivait à supprimer « l'effet des bords ». Or cet effet est détruit si les courants électroniques sont maintenus au milieu de la structure. Une concentration latérale de cette sorte est aussi désirable, comme on le sait, pour accroître la région de dépendance linéaire du courant de sortie. Les moyens susceptibles de produire cette concentration furent déjà décrits dans le chapitre relatif à la concentration en général. Le premier de ces moyens qui fut utilisé, consiste à fermer les extrémités des électrodes par des cloisons planes normales aux génératrices (voir fig. 10 A). Un multiplicateur à 10 électrodes multiplicatrices de ce genre avait en effet une région aggrandie dans laquelle le courant de sortie était proportionnel au courant originel. Cependant, le courant résiduel, quoique un peu réduit, était resté encore assez grand (100 μA pour un gain de 10^6). De plus la réaction ionique est restée mesurable.

Puisque la suppression de « l'effet des bords » s'est montrée insuffisante, il fut décidé d'obstruer toutes les trajectoires possibles que les ions peuvent emprunter pour se diriger vers les électrodes négatives, et de voir si alors le courant résiduel devenait vraiment petit. Dans ce but, le premier tube du type C construit, fut ouvert et plusieurs écrans métalliques y furent insérés. Ces écrans métalliques s'étendent normalement de la structure des électrodes jusqu'aux parois du tube. Sur les côtés des électrodes, ils ont la forme de la surface équipotentielle de l'électrode à laquelle ils sont attachés, de façon à ne pas altérer le champ et conserver les propriétés de concentration. Ils pénètrent légèrement à l'intérieur de la structure des électrodes pour supprimer « l'effet des bords ». La figure 20 montre le tube après sa modification. Trois écrans furent placés à divers étages de façon à assurer une protection générale aussi parfaite que possible et aussi pour empêcher les réactions « partielles ». L'insertion de ces écrans se révéla un parfait remède car le courant résiduel devint de quelques microampères seulement avec un gain d'un million. La réaction ionique, encore mesurable, la constante a étant égale à 2×10^{-7}, fut considérée inoffensive parce qu'elle fut attribuée aux ions collectés directement par le fil de la photo-cathode laissé nu. Des écrans furent aussi introduits dans le multiplicateur dont les électrodes étaient terminées par des plans latéraux. Ces écrans s'étendaient seulement de l'arrière des électrodes jusqu'aux parois de l'enveloppe sans protéger les côtés de la structure des électrodes. Le courant résiduel devint 1 μA pour un gain de 10^6 et la réaction ionique devint enfin non mensurable. Cette expérience confirma l'hypothèse relative à « l'effet des bords », puisque celui-ci est effectivement supprimé par les plans latéraux fermant les électrodes. Elle confirma aussi celle relative à la collection des ions par le fil de la photo-cathode, qui était soigneusement isolé sur toute sa longueur.

Dans tous les tubes construits par suite il a été indispensable d'empêcher complètement tout retour des ions. Cela fut réalisé par des moyens divers qui seront décrits en relation avec les diverses constructions spécifiques adoptées pour réduire les autres causes du courant résiduel. L'expérience a montré d'une

façon définitive qu'aucune liberté ne peut être prise dans cette protection contre les ions intempestifs et que la réaction ionique est toujours observée si une voie quelconque est laissée non obstruée. L'existence de la réaction ionique, autre que celle due aux ions collectés par le fil de la photo-cathode, est toujours accompagné d'un fort courant résiduel. Il est difficile de justifier la nécessité d'une obstruction si complète. En particulier, il n'est pas immédiatement évident que les ions qui heurtent les parties des électrodes d'où les électrons secondaires ne peuvent pas être libérés puissent donner lieu à un mécanisme régénérateur quelconque. Il n'est pas très étonnant, par contre, qu'avec les gains énormes obtenus par la suite (10^8 à 10^9) la moindre régénération provoque immédiatement un grand courant stationnaire. L'étude de ce mécanisme de régénération n'a pas été plus approfondie puisque notre but immédiat, la réduction du courant résiduel, est atteint. En effet, l'expérience montre l'absolue nécessité d'une obstruction complète de tous les chemins possibles par lesquels les ions pourraient passer des étages de multiplication finals aux étages initiaux.

(à suivre).