

ECOLE CENTRALE
de ELECTRONIQUE *et*

12, RUE DE LA LUNE

PARIS 2^e

CEN. 78-87

LES TUBES THERMIONIQUES

Michel R. ROSTAGNAT

Professeur principal
des classes d'Agent Technique 3^e Année



LA CONSTITUTION DE LA MATIERE

Introduction.

Contrairement aux apparences la matière constitutive de tous les corps n'est pas homogène. Les chimistes ont pressenti que les corps matériels résultent de la combinaison d'éléments infiniment petits, échappant aux investigations de l'oeil et même des plus puissants microscopes. Ce point de vue a été confirmé par les physiciens à la suite de calculs et d'expériences fondamentales.

Il en résulte qu'un corps matériel quelconque ne peut pas être divisé à l'infini tout en conservant l'ensemble de ses propriétés, il vient un moment où l'on est en présence de particules élémentaires dont la division ne peut être effectuée qu'avec un bouleversement des propriétés en question.

Ces éléments ou corpuscules sont appelés atomes et molécules.

Cas des corps simples.

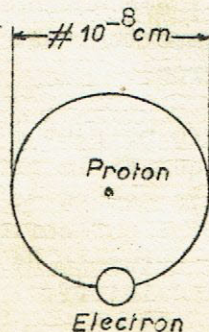
Un corps simple est formé de particules extrêmement petites nommées " atomes " ; ils sont tous identiques les uns aux autres.

Cas des corps composés.

Dans un corps composé les atomes des différents corps simples constitutifs s'assemblent en proportions bien déterminées pour former des particules extrêmement petites elles aussi nommées molécules, toutes identiques les unes aux autres.

L'atome le plus simple est celui de l'hydrogène.

Constitution de l'atome d'hydrogène.



Il est constitué d'une particule centrale qui est le noyau ; dans le cas particulier de l'hydrogène ce noyau est appelé proton.

Autour de ce noyau gravite une particule nommée électron. Nous admettrons que cette gravitation est circulaire. L'espace entre le noyau et l'électron est considérable si bien que pour son plus grand volume l'atome est surtout constitué de vide.

Différents états des corps.

D'une façon générale le caractère compressible d'un gaz (de l'hydrogène par exemple) est dû au fait que ses atomes constitutifs sont mobiles les uns par rapport aux autres ; ils sont d'ailleurs en perpétuelle agitation et le phénomène de la pression est une manifestation de cette agitation. Lorsque l'on comprime une certaine masse de gaz, il en résulte une augmentation du nombre d'atomes par unité de volume en même temps qu'une augmentation de l'agitation des atomes.

Au contraire les corps liquides sont fluides parce que leurs atomes ou leurs molécules sont mobiles (comme dans le cas des gaz), mais en revanche ils sont incompressibles car on ne peut augmenter le nombre de leurs atomes ou de leurs molécules par unité de volume.

Enfin, les corps solides ne sont ni fluides ni compressibles car leurs atomes ou leurs molécules sont liés réciproquement par des forces très importantes. Ils ne peuvent donc se déplacer facilement les uns par rapport aux autres.

Nature électrique de l'atome d'hydrogène.

A l'état libre naturel, l'atome d'hydrogène est électriquement neutre il en est ainsi d'ailleurs de tous les autres atomes ainsi que des molécules à l'état libre naturel.

Atomes des différents corps.

Ils diffèrent entre eux :

- a) Par le nombre des électrons qui gravitent autour du noyau (depuis 1 pour l'hydrogène jusqu'à 92 pour l'uranium).
- b) Par la constitution du noyau dont la masse varie suivant le corps. Le noyau le plus petit est celui de l'atome d'hydrogène ; sa masse est 1840 fois plus grande que celle d'un électron.

Désignation de la couche	Nombre maximum d'électrons
K	2
L	8
M	18
N	32
O	18
P	14

Total	92

On considère que le noyau d'un atome quelconque constitue la partie centrale de cet atome et autour duquel gravitent les électrons répartis en différentes couches ; ces couches sont au nombre de 6 et comportent une quantité maximum d'électrons.

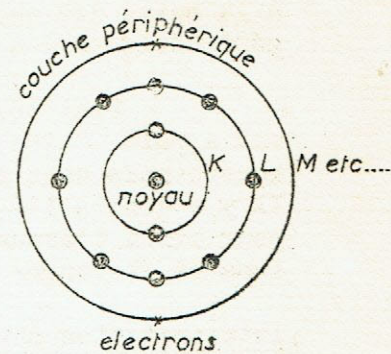
Une couche donnée ne peut être pourvue d'électrons que si la précédente est complète. Le nombre total des électrons est 92 ce qui correspond aux 92 corps simples naturels de la classification de Mendéléieff.

Il existe des corps hors classification qui ont plus de 92 électrons

mais dont l'existence est éphémère.

Remarque :

D'une façon générale on appelle couche périphérique la couche d'électrons qui, dans un atome, est la plus éloignée du noyau, c'est la seule qui puisse n'être pas complète. Les électrons qui gravitent autour du noyau sont généralement appelés électrons planétaires.



Constitution du proton.

Le proton est le noyau le plus simple, c'est lui qui correspond à toute la masse matérielle de l'atome.

Il est chargé positivement : $e = 1,59.10^{-19}$ Coulomb

Nature du noyau d'un corps quelconque.

C'est dans le noyau qu'est localisée la masse matérielle de l'atome. Le noyau peut être considéré comme une association de protons. Sa charge est d'autant plus positive qu'il compte davantage de protons.

Nature de l'électron.

Les électrons de tous les corps sont identiques, dénués de masse matérielle, mais pourvus d'une masse apparente qui résulte de sa charge électrique ; en effet l'électron constitue précisément la charge électrique élémentaire habituellement désignée par " e ". Cette charge est négative et vaut : $e = - 1,59.10^{-19}$ Coulomb .

D'une façon générale la charge négative des électrons d'un atome vient compenser la charge positive de son noyau, ce qui justifie le caractère électriquement neutre d'un atome.

Remarque :

Le proton ne forme pas en réalité un tout indivisible, mais peut être divisé en deux particules :

- a) Le neutron, électriquement neutre et pourvu de masse matérielle.
- b) Le positon pourvu de la charge positive du proton.

Sauf cas exceptionnel le positon ne peut être séparé du neutron et nous n'aurons plus l'occasion de le faire intervenir par la suite.

Atomes ionisés et électrons libres.

En raison de l'agitation moléculaire dont ils sont le siège, et en raison de la constitution des couches périphériques de leurs atomes, certains corps présentent naturellement des électrons à l'état libre appelés " électrons libres ". En effet l'agitation moléculaire suffit dans certains cas pour libérer

à la suite des chocs atomiques qui en résultent, un ou plusieurs des électrons périphériques des atomes heurtés.

Tout atome ou toute molécule qui a perdu un ou plusieurs électrons est appelé " ion ". La molécule ou l'atome ionisé n'est plus électriquement neutre mais dans le cas de la perte d'électrons : " chargé positivement ". Il y a donc à l'égard des électrons libres voisins, un effet attractif qui a pour effet d'assurer à plus ou moins brève échéance une recombinaison entre ions et électrons pour former à nouveau des atomes.

Interprétation physique du courant électrique.

Les trajectoires des électrons libres sont régies par les lois du hasard et complètement désordonnées. Il en résulte que la quantité d'électricité moyenne transportée pendant un intervalle de temps donné dans un certain volume est absolument nulle.

En revanche si on applique une certaine différence de potentiel à un corps, à l'intérieur duquel évoluent des électrons libres, ces derniers tendent à suivre des trajectoires identiquement orientées. En effet les électrons les plus attirés par la charge positive du pôle positif de la source de tension, tendent à se diriger vers celui-ci en remontant le sens des lignes de force du champ électrique.

Il en résulte donc un déplacement massif d'électrons dans le même sens : c'est ce déplacement unilatéral d'électrons et donc ce transport de charges négatives qui matérialise le courant électrique.

Sens électronique et sens conventionnel du courant électrique.

Le courant électronique se déplace donc dans le sens $\overrightarrow{-+}$. Or, on apprend dans les cours de physique générale que le courant électrique se déplace dans le sens $\overrightarrow{+-}$: sens conventionnel.

En réalité il n'y a pas contradiction : cette incompatibilité apparente est simplement due au fait qu'on a considéré conventionnellement avant la découverte de l'électron, que le courant électrique résultait d'un déplacement de charges positives ; or, on a constaté par la suite, qu'il s'agissait en réalité d'un déplacement de charges négatives.

A chaque fois qu'on ne précisera pas la nature des charges transportées, il s'agira toujours du sens conventionnel : $\overrightarrow{+-}$; dans le cas contraire on précisera " sens électronique " .

Corps conducteurs et corps isolants.

Les corps conducteurs sont ceux qui présentent naturellement un grand nombre d'électrons libres par unité de volume, électrons qui sont susceptibles de se mouvoir unilatéralement sous l'action d'un champ électrique, d'où courant électrique.

Au contraire, les corps isolants sont ceux qui ne présentent pas naturellement un grand nombre d'électrons libres par unité de volume.

L'isolant idéal ne présente aucun électron libre, donc il ne peut être l'objet d'aucun déplacement de charges électriques. Les principaux conducteurs sont d'une part les métaux et d'autre part certains liquides appelés " électrolytes " .

INFLUENCE D'UN CHAMP ELECTRIQUE SUR UN ELECTRON EN MOUVEMENT DANS LE VIDE

INFLUENCE D'UN CHAMP MAGNETIQUE SUR UN ELECTRON EN MOUVEMENT DANS LE VIDE

1°) Champ électrique.

On dit qu'il y a champ électrique en un point si une force s'exerce sur une charge électrique immobile située en ce point.

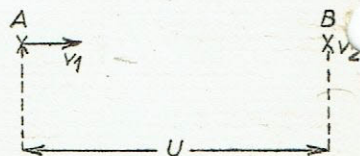
Action d'un champ électrique sur un électron en mouvement.

Soit un électron en mouvement dans l'espace où règne un champ électrique. Afin que les trajectoires électroniques ne soient pas contrariées, on considère que le vide règne dans l'espace considéré. On constate alors que les conditions de déplacement de l'électron sont modifiées très notablement en raison de sa charge.

Lorsqu'un électron en mouvement se trouve dans un champ électrique sa trajectoire se modifie de telle sorte qu'il se dirige vers l'électrode positive, en remontant les lignes de forces électriques.

Exemple :

Soit un électron pourvu au point A d'une vitesse initiale v_1 et se dirigeant en raison du phénomène précédent vers le point B présentant vis-à-vis de A une différence de potentiel U .



L'électron a acquis en B une vitesse v_2 différente de v_1 .
Si l'électron possédait au point A une énergie cinétique : $w_1 = \frac{1}{2} m v_1^2$,
au point B cette énergie sera : $w_2 = \frac{1}{2} m v_2^2$.

Grâce à la différence de potentiel U , l'électron aura acquis entre A et B un surcroît d'énergie cinétique :

$$w_2 - w_1 = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2)$$

ou encore :
$$\Delta w = \frac{1}{2} m \Delta v^2$$

de cette relation on peut tirer la quantité Δv , c'est-à-dire, l'accroissement de vitesse subie par l'électron.

On a :
$$\Delta v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta w}{m}}$$

Or, l'accroissement d'énergie Δw peut encore s'écrire, pour un électron :

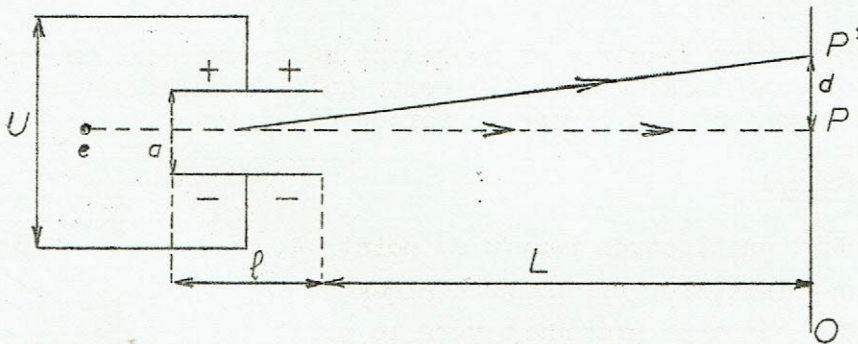
$$\Delta w = e \cdot U$$

finalement, l'accroissement de vitesse s'écrira sous la forme :

$$\Delta v = \sqrt{2 \frac{e}{m} \cdot U} \quad \left\{ \begin{array}{l} e : \text{ Charge de l'électron} \\ m : \text{ Masse de l'électron} \end{array} \right.$$

On constate que pour un électron, l'accroissement de vitesse dépend uniquement de la différence de potentiel U .

On peut illustrer l'explication précédente du comportement d'un électron en mouvement dans un champ électrique par la figure ci-dessous.



L'électron " e " , lancé à une vitesse v entre les plateaux d'un condensateur se propagera en ligne droite si le condensateur n'est pas chargé.

L'électron viendra donc frapper l'obstacle O en un point P . Si un champ électrique règne, l'électron sera dévié pendant son passage entre les armatures du condensateur. Il frappera alors l'obstacle en P' . La distance " d " entre P et P' dépend de la vitesse initiale de l'électron ainsi que de : v, a, l, L .

Remarque :

Tout ce qui précède concerne un électron en mouvement possédant une vitesse initiale v_1 .

Si l'électron avait au départ une vitesse nulle, la différence de potentiel à laquelle l'électron est soumis suffirait à lui donner une vitesse ayant pour valeur :

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} U}$$

Cependant la formule précédente n'est valable que pour des vitesses v bien inférieures à la vitesse de la lumière ($c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s) ; en effet, lorsqu'un corpuscule en mouvement se rapproche de la vitesse de la lumière, sa masse devient très élevée et on ne peut plus employer la formule précédente sans risque d'erreurs.

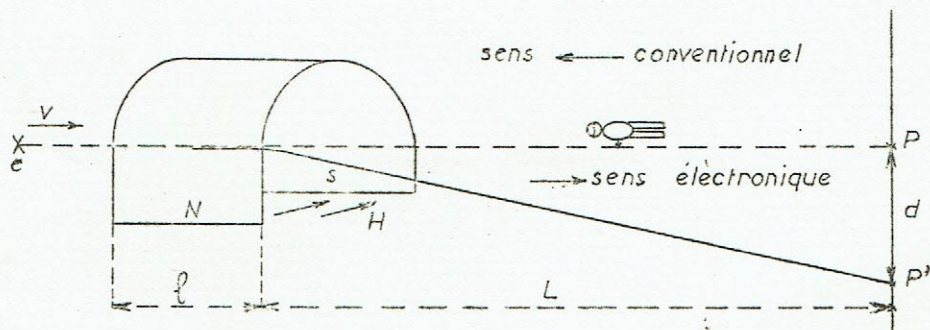
2°) Champ magnétique.

Le champ magnétique a pour effet de modifier la trajectoire initiale de l'électron en mouvement.

Considérons le cas particulier où un électron e lancé à une vitesse v coupe perpendiculairement un champ magnétique H . Dans ce cas l'électron subira une déviation d qui dépendra de sa vitesse v , ainsi que des grandeurs H, ℓ, L .

Le sens de la déviation sera trouvé, par exemple, au moyen de la règle du bonhomme d'Ampère :

L'observateur couché sur le courant lui sortant par la tête (sens conventionnel) voit la déviation s'exercer vers la gauche s'il regarde dans la direction du champ.



Remarque :

Un champ magnétique est sans action sur un électron immobile.

Emission d'électrons par un conducteur.

Une surface conductrice peut libérer des électrons, c'est-à-dire donner naissance à une émission électronique dans 3 cas bien définis :

1°) Emission Thermo-ionique ou Thermionique.

Lorsque la surface conductrice considérée est portée à haute température, on constate que des électrons sont expulsés dans l'espace voisin.

Le phénomène est dû à l'intensité considérable que prend l'agitation moléculaire lorsque la température du corps est élevée.

2°) Emission secondaire ou Emission " par chocs ".

Lorsque la surface conductrice considérée est bombardée par des particules, telles qu'électrons, ions, etc... , on constate une émission électronique, dite émission secondaire, et qui est consécutive aux dissections résultant des chocs superficiels.

3°) Emission Photo-électrique.

Lorsque la surface conductrice considérée est soumise à l'action d'un faisceau lumineux relativement intense, on constate une émission électronique consécutive au bombardement des photons.

Nécessité du vide.

Le vide n'est pas nécessaire en ce qui concerne l'émission même. En revanche il permet aux électrons de la surface émissive de se déplacer sans risque de rencontre avec les obstacles infranchissables que constituent les molécules d'air ou de gaz ambiant.

En pratique, le vide absolu est impossible à obtenir, mais on peut le pousser de façon telle que la probabilité de rencontre avec les molécules du gaz soit excessivement faible.

II - EMISSION THERMIONIQUE

Nous nous proposons d'étudier tout particulièrement le cas de l'émission thermionique car c'est lui qui intéresse précisément le fonctionnement des tubes thermioniques.

On caractérise l'aptitude d'un corps à émettre des électrons lorsqu'il est porté à haute température par son pouvoir émissif électronique.

Le nombre d'électrons émis par cm^2 de surface incandescente pendant une seconde, correspond au transport d'une certaine charge d'électricité, c'est-à-dire en définitive à la circulation d'un courant électrique.

C'est pourquoi le pouvoir émissif électronique d'une surface incandescente portée à une certaine température absolue T , est pratiquement mesuré en ampères par centimètre carré (A/cm^2).

Variation de l'intensité électronique en fonction de la température.

Formule de RICHARDSON et DUSHMAN.

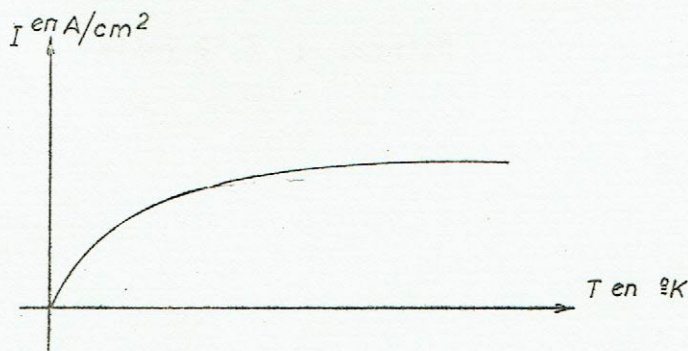
Ces physiciens ont déterminé le pouvoir émissif d'un corps (en ampère par cm^2) en fonction de la température absolue T . La formule à laquelle ils ont abouti s'écrit :

$$I(\text{A}/\text{cm}^2) = A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{b_0}{T}}$$

A et b_0 dépendent du corps utilisé.

e : base des logs népériens $e = 2,71828$

L'intensité augmente assez rapidement avec la température. L'étude mathématique de la formule précédente montre qu'en fonction de la température l'intensité suit une loi exponentielle ce qui se traduit par la courbe suivante :



Charge d'espace ou charge spatiale.

Les électrons émis par un corps incandescent constituent autour de

ce dernier un nuage chargé négativement : pour cette raison ce nuage est appelé " charge d'espace " ou " charge spatiale " .

Les électrons qui constituent la charge d'espace sont retenus en très grand nombre autour du corps émissif par les charges positives qu'ils ont laissés sur celui-ci ; il en résulte que la densité du nuage en question, maximum aux environs du corps émissif, va en décroissant lorsqu'on s'en éloigne. Enfin, cette charge d'espace exerce un effet répulsif à l'égard des électrons qui tendent à s'échapper du corps considéré.

Energie de sortie des électrons. Vitesse de sortie. Potentiel de sortie.

Soit un corps émissif incandescent : les électrons qui en raison de l'agitation moléculaire tendent à quitter les atomes auxquels ils appartiennent, subissent, de la part de ceux-ci un effet attractif, d'autant plus faible que la distance est plus grande à l'instant considéré. Il en résulte que pour être définitivement émis par un corps incandescent, les électrons doivent être pourvus d'une énergie suffisante leur permettant de s'éloigner définitivement du corps émissif, cette énergie, qui dépend de la nature de ce dernier est appelée énergie de sortie du corps considéré.

On peut encore exprimer l'énergie en question par la vitesse qui doit être imprimée à l'électron pour que l'énergie cinétique emmagasinée soit égale à l'énergie de sortie, c'est-à-dire pour que l'électron échappe à l'attraction du corps incandescent: cette vitesse est appelée vitesse de sortie.

Enfin, si l'on considère le déplacement spontané dont est l'objet un électron initialement immobile et situé dans un champ électrique, on peut encore remplacer la notion de vitesse de sortie par celle de "Potentiel de sortie" .

Soit W l'énergie de sortie du corps considéré ; électriquement cette énergie peut s'écrire $W = Q V$, soit encore $W = e.V$ pour un électron. De cette relation, on tire :

$$V = \frac{W}{e} \quad \text{avec } e : 1,59.10^{-19} \text{ C.}$$

V est le potentiel de sortie du corps en question. Pour les corps émetteurs utilisés pratiquement, la valeur de ce potentiel est de quelques volts.

Exemple : Wolfram : 4,52 volts

III - LE TUBE DIODE

Constitution du tube diode.

Le tube diode est le premier et le plus simple des tubes thermioniques. Il est constitué principalement, comme son nom l'indique de 2 électrodes. En réalité un tube diode élémentaire comprend :

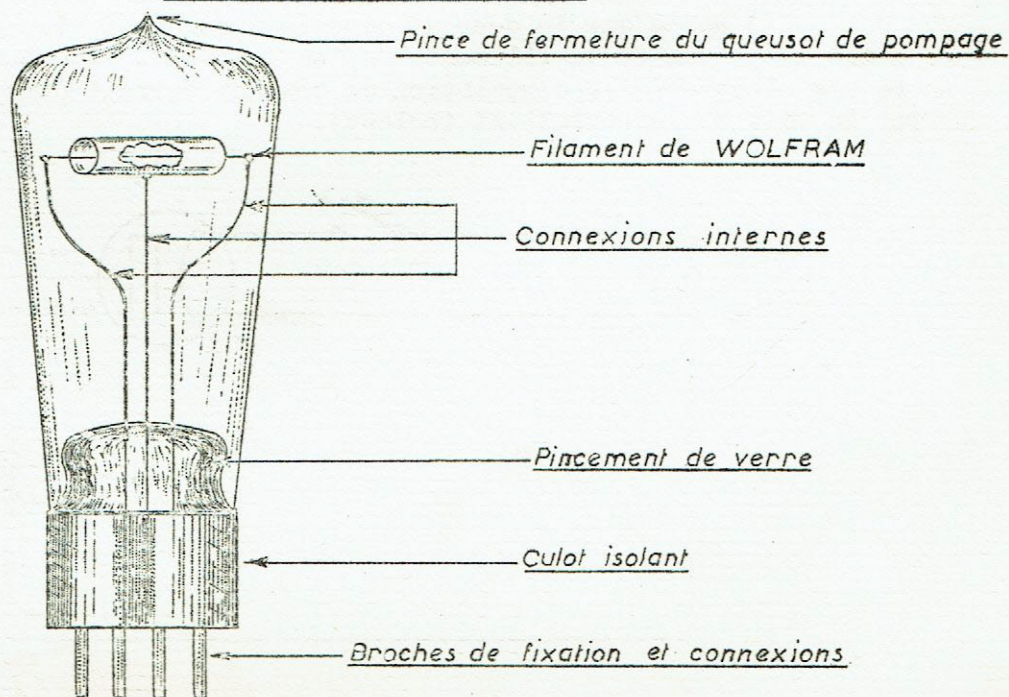
- 1°) une ampoule généralement de verre à l'intérieur de laquelle règne un vide très poussé ; c'est dans cette ampoule que sont situées les 2 électrodes.
- 2°) un filament de Wolfram fin et de forme rectiligne.
- 3°) une plaque métallique cylindrique dont l'axe se confond avec le filament.

Remarque :

Jusqu'à ces dernières années les électrodes étaient maintenues à l'intérieur de l'ampoule par des conducteurs rigides et des isolants; à la base de l'ampoule, se trouvait le culot en matière isolante sur lequel étaient fixées les broches de connexions.

Maintenant la construction est très simplifiée et les tubes présentent un fond plat à travers lequel sortent directement les broches de connexions reliées aux électrodes intérieures par des conducteurs très courts ; ces tubes sont dépourvus de culot.

Tube Diode (Ancien Modèle)



Représentation schématique d'un tube diode



Expérience fondamentale d'Edison.

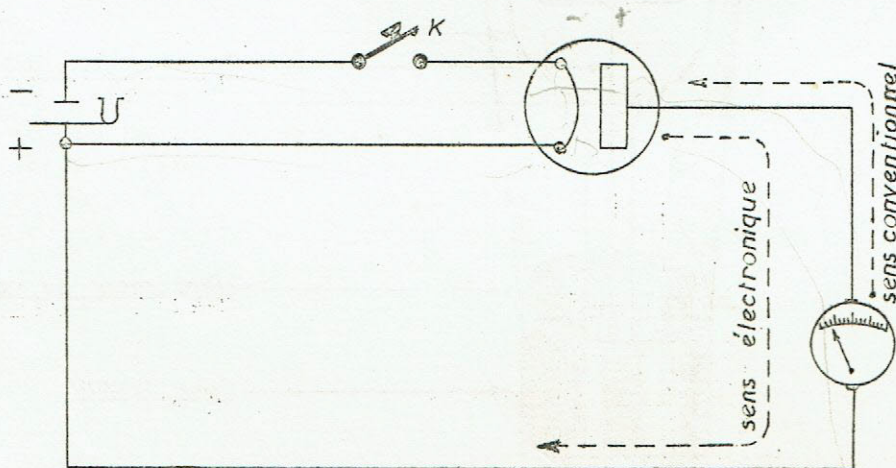
Soit un tube diode dont le filament est porté à l'incandescence à l'aide d'une pile ou d'un accumulateur par exemple; entre plaque et filament on dispose une connexion comprenant un galvanomètre, c'est-à-dire un appareil capable de déceler le passage d'un courant électrique, aussi faible soit-il.

On abaisse la clé de l'interrupteur K et, dès que l'incandescence du filament est obtenue on constate une déviation de l'aiguille du galvanomètre, c'est-à-dire le passage d'un courant dans le circuit extérieur entre plaque et filament.

Ce phénomène était, à l'époque d'Edison, absolument inexplicable et semblait défier les lois connues de l'électricité:

1°) Parce qu'on constate la circulation d'un courant en l'absence de toute source utile de tension. En effet, le générateur U ne sert qu'à assurer l'incandescence du filament. En retirant la pile on constate d'ailleurs que le galvanomètre dévie encore en raison de l'inertie thermique du filament.

2°) Parce que le courant circule manifestement à l'intérieur du tube entre la plaque et le filament. Or, en raison du vide poussé qui règne entre ces électrodes la circulation du courant devrait être impossible (en effet le vide est un excellent isolant).

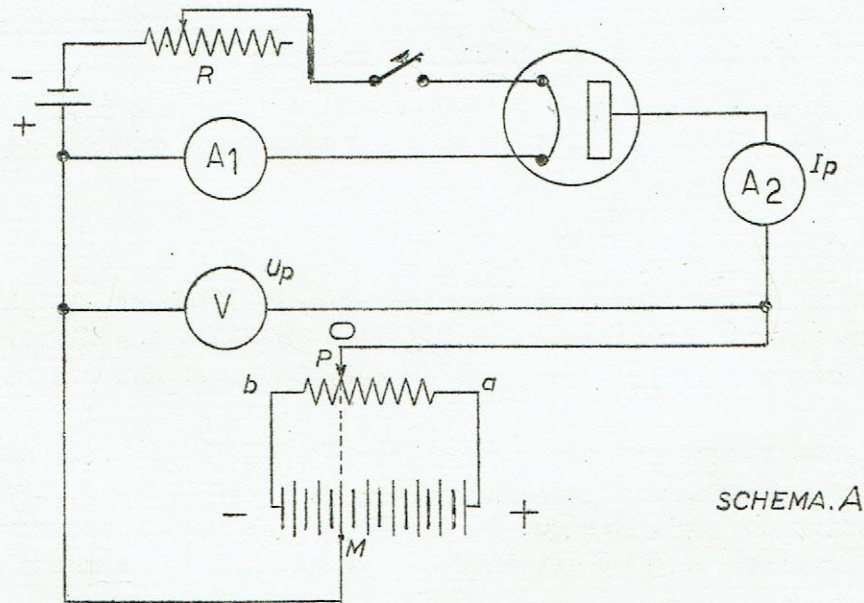


Explication de l'effet Edison.

Le filament incandescent émet des électrons qui constituent le nuage appelé charge spatiale. En raison des électrons que ces atomes ont perdus, le filament est chargé positivement vis-à-vis de la charge spatiale et la plaque réunie extérieurement au filament est ainsi portée à un potentiel légèrement positif vis-à-vis de la charge spatiale. Il y a donc attraction des électrons par la plaque et circulation électronique extérieure entre plaque et filament.

Ce courant électronique correspond évidemment à un courant électrique circulant à l'intérieur dans le sens plaque-filament (sens conventionnel). Etant donné la faiblesse du champ électrique régnant entre plaque et charge d'espace, le courant présente une très faible intensité, elle est de l'ordre de quelques dizaines de microampères.

Intervention d'une différence de potentiel entre la plaque et le filament.



Conformément au schéma (A) la plaque est portée à une tension positive par rapport au filament. R est une résistance variable permettant de régler l'intensité du courant dans le filament (rhéostat). A_1 est un ampèremètre destiné à mesurer l'intensité du courant du filament. P est une résistance à prise mobile (potentiomètre) située en parallèle sur une batterie de piles ou d'accumulateurs dite "batterie de haute tension" (H.T.), par opposition à la batterie de chauffage dite batterie de basse tension (B.T.).

En déplaçant le curseur du potentiomètre on fait varier la tension de la plaque vis-à-vis du filament ; à l'extrémité " a " la tension plaque est parvenue à son maximum et, à l'extrémité " b " , la tension plaque est parvenue à sa valeur la plus négative. La position du point M est précisément telle que l'on puisse porter la plaque à une tension négative vis-à-vis du filament .

Enfin le voltmètre V permet de mesurer la tension de la plaque vis-à-vis du filament (U_p) et l'ampèremètre A_2 permet de mesurer l'intensité du courant de plaque (I_p).

Etude expérimentale.

Il existe une position du curseur pour laquelle la différence de potentiel entre plaque et filament est nulle, l'ampèremètre A_2 indique alors le courant constaté lors de l'expérience d'Edison. Déplaçons le curseur vers "a":

La tension plaque mesurée par V augmente et le courant de plaque mesuré par A_2 augmente aussi.

Au contraire, lorsque nous portons la plaque à une tension négative en déplaçant le curseur vers "b", le courant de plaque devient inférieur et s'annule à $-1,5$ volt environ.

Il en résulte que le tube diode n'est pratiquement conducteur que lorsque la plaque est positive vis-à-vis du filament.

Dans le cas contraire, il se conduit comme une résistance infinie : on exprime ceci en disant que le tube diode présente une conductibilité électrique unilatérale.

Explication :

a) La plaque est positive vis-à-vis du filament. Le champ électrique qui règne alors entre plaque et filament accélère les électrons à la sortie de ce dernier de telle sorte que le courant de plaque est augmenté.

b) La plaque est négative vis-à-vis du filament. Le champ électrique, de sens opposé au cas précédent exerce maintenant un effet ralentisseur, d'où diminution de I_p . Dès que la tension plaque atteint environ $-1,5$ volt, plus aucun électron ne peut atteindre la plaque et I_p tombe à zéro.

Remarque :

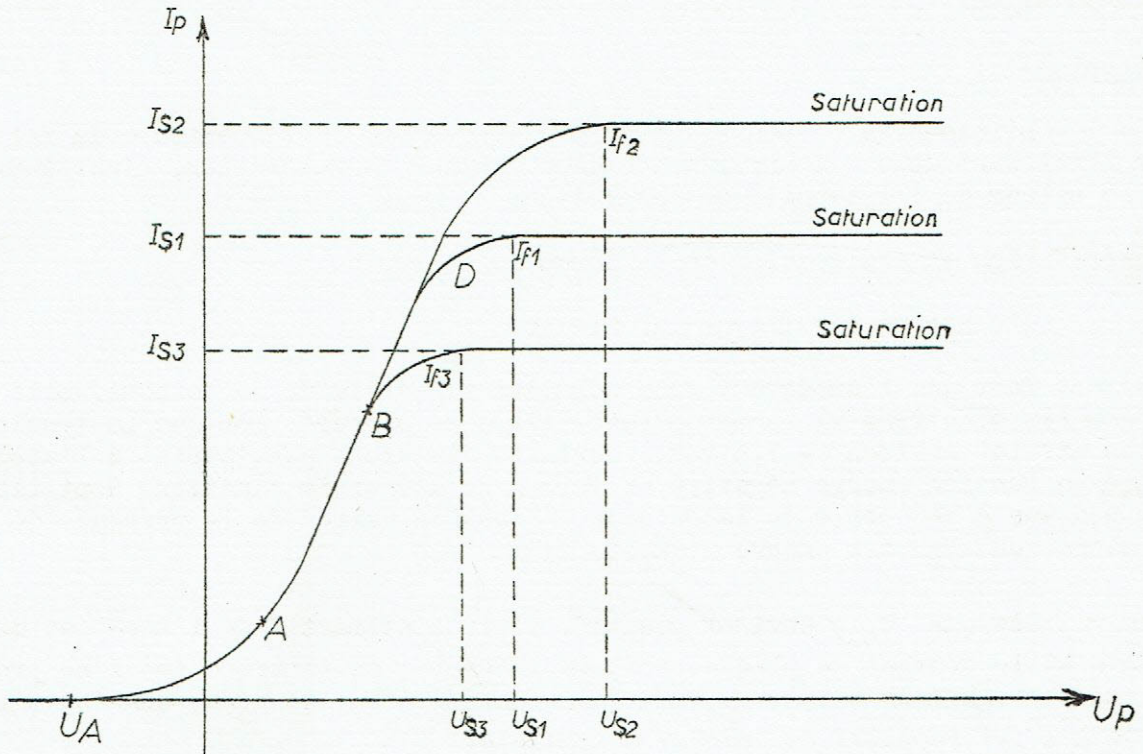
Le courant ne peut alors changer de sens puisque les électrons ne peuvent circuler de la plaque au filament.

Désignation " Anode " et " Cathode " .

La plaque d'un tube diode étant, le plus souvent, portée à une tension positive, est appelée " anode " (chemin d'en haut, étymologiquement).

D'autre part, le filament porté à une tension négative est appelé " cathode " (chemin d'en bas).

Courbe caractéristique du tube diode.



Nous nous proposons de déterminer graphiquement comment varie l'intensité du courant de plaque en fonction de la tension de plaque, c'est-à-dire de tracer expérimentalement la courbe de variation de la fonction $I_p = f(U_p)$ pour différentes valeurs de l'intensité traversant le filament.

Donnons à cette intensité une première valeur $I f_1$ et rendons la plaque suffisamment négative pour que le courant de plaque ne puisse pas circuler. Progressivement augmentons U_p ; à partir d'une certaine valeur U_A le milliampèremètre A_2 dévie et indique la naissance d'un courant plaque qui croît en même temps que U_p . Cette croissance, d'abord lente, devient rapide et suit bientôt une loi linéaire : portion rectiligne A B. A partir d'un point D la courbe s'infléchit et bientôt I_p n'augmente pratiquement plus en fonction de U_p : c'est la saturation. La forme générale de la courbe obtenue est la même pour tous les tubes diodes.

Augmentons maintenant $I f$ jusqu'à la valeur $I f_2$ et recommençons l'expérience précédente à partir d'une tension plaque très négative. Le courant plaque apparaît à nouveau lorsque $U_p = U_A$, et la courbe est pratiquement superposée à la première jusqu'au point B. Cependant, la partie rectiligne se prolonge au-delà et la saturation se produit pour une tension plaque $U_{S2} > U_{S1}$.

Enfin réglons $I f$ à une valeur $I f_3$ inf^{re} à $I f_1$. On obtiendra une troisième courbe d'abord superposée aux 2 premières, puis les quittant pour une

tension de plaque relativement faible : la saturation apparaît lorsque

$$U_p = U_{S3} < U_{S1} .$$

Conclusion.

L'intensité de chauffage et par conséquent la température du filament n'influent donc que sur l'ordonnée du palier de saturation, c'est-à-dire sur la valeur de l'intensité de saturation.

Interprétation et explication de la forme de la courbe.

1°) Région curviligne inférieure.

Tant que l'anode est très négative vis-à-vis de la cathode, elle repousse les électrons et aucun courant plaque ne circule. Dès que la tension plaque atteint environ - 1,5 volt, certains électrons parviennent à l'anode, malgré sa tension encore négative en raison de l'énergie cinétique dont ils sont pourvus à la sortie de la cathode ; c'est la raison de la présence de I_p alors que U_p est encore négatif.

Dès que U_p , devient positif, l'effet attractif de l'anode se manifeste et le courant de plaque croît rapidement ; on remarque qu'il ne prend pas immédiatement sa valeur maximum imposée par la loi de Richardson en raison de l'effet répulsif de la charge spatiale.

2°) Région rectiligne A B .

Ici I_p croît à peu près proportionnellement à U_p .

3°) Région curviligne supérieure.

En raison de l'importance des tensions plaques qui y correspondent, la charge d'espace est très appauvrie et tend à s'annuler.

A partir de la tension plaque U_S , la charge d'espace disparaît complètement et dès son émission tout électron est attiré par l'anode : c'est la " saturation " .

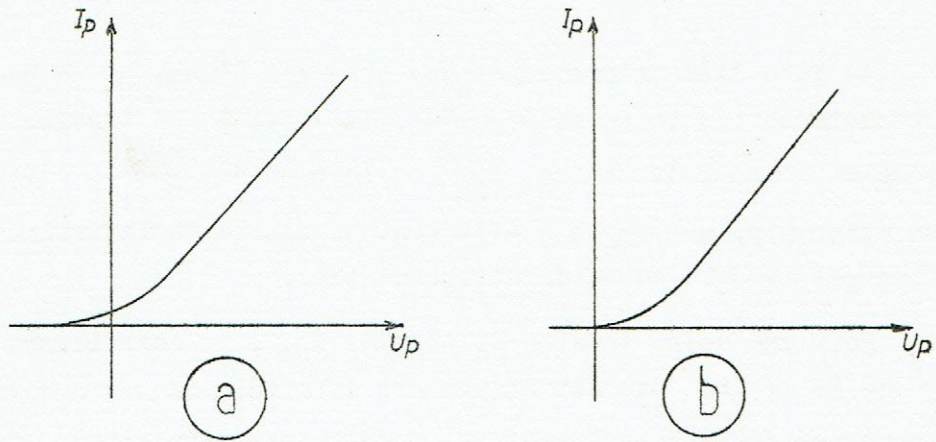
L'intensité de saturation par cm^2 de surface émissive est évidemment donnée par la loi de Richardson :

$$I(A/cm^2) = A.T^2 . e^{-\frac{b_0}{T}}$$

Equation de la courbe caractéristique.

La courbe réelle a évidemment une équation très compliquée. Etant donné que l'on ne fait jamais fonctionner les tubes dans la région correspondant à la saturation, il n'est pas nécessaire de connaître l'équation de toute la courbe.

En principe celle de la partie (a) suffit.



On peut même considérer que la courbe part de l'origine des axes de coordonnées, ce qui revient à tenir l'effet Edison pour négligeable (courbe (b)).

En admettant que la courbe (b) présente une partie inférieure parabolique et l'autre partie pseudo rectiligne, le physicien Langmuir a assimilé la courbe (b) à une semi-cubique dont l'équation est :

$$I_p = a \cdot U_p^{3/2}$$

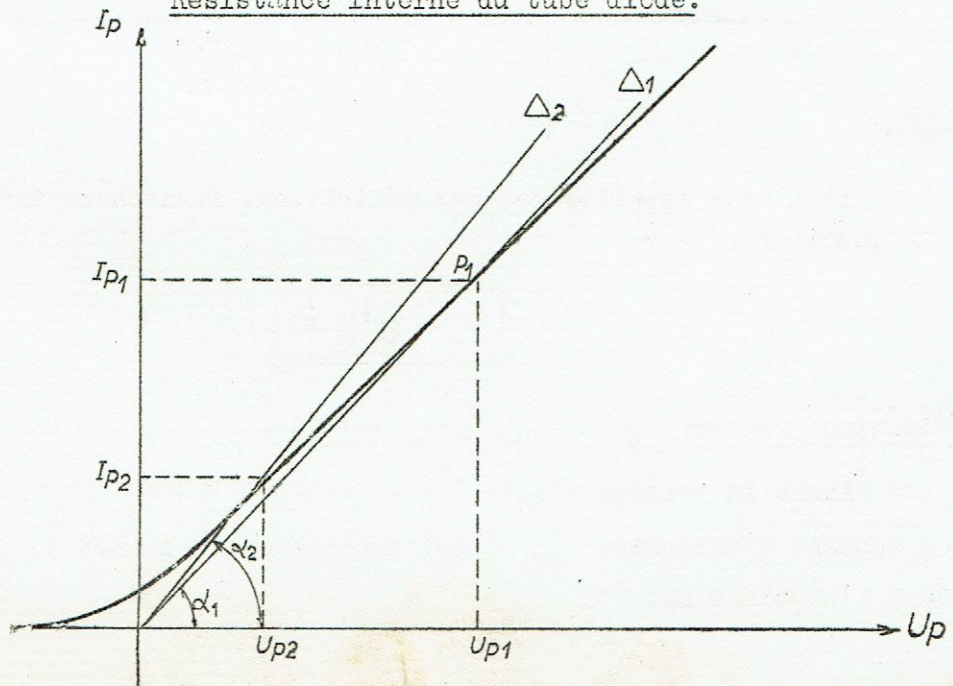
a : constante de Langmuir

La courbe est ainsi intermédiaire entre la droite et la parabole :

$$I_p = a U_p^{2/2} \quad \text{et} \quad I_p = a \cdot U_p^{4/2}$$

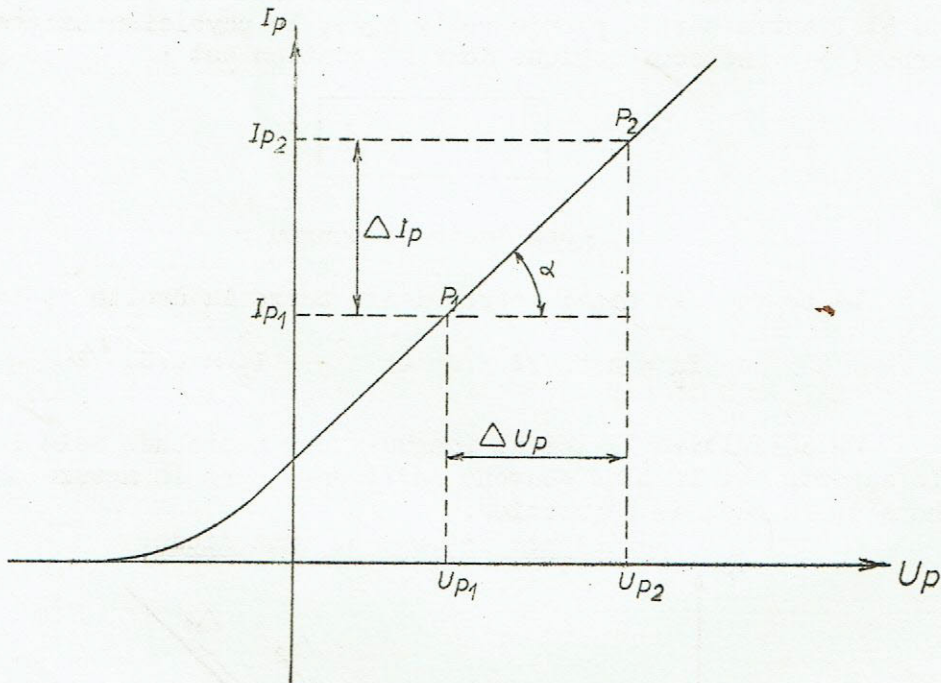
En définitive la loi de Langmuir est approchée mais la précision qu'elle apporte est le plus souvent suffisante dans la mesure où on l'utilise en dehors de la zone de saturation.

Résistance interne du tube diode.



Le tube diode n'obéissant pas à la loi d'Ohm, on ne peut caractériser sa résistance par le quotient $\frac{U_p}{I_p}$. En effet à une tension plaque U_{p1} correspond un courant de plaque I_{p1} et le quotient $\frac{I_{p1}}{U_{p1}}$, inverse de la résistance apparente, mesure le coefficient angulaire de la droite Δ_1 qui ne se confond pas avec la caractéristique du tube.

Pour une autre tension de plaque U_{p2} , le coefficient angulaire I_{p2}/U_{p2} de la droite Δ_2 est différent, à la fois de $\text{tg } \alpha_1$ et du coefficient angulaire de la partie rectiligne de la caractéristique. On obtiendra donc la résistance réelle offerte entre anode et cathode en mesurant le coefficient angulaire de la partie rectiligne de la caractéristique et en prenant son inverse.



Ainsi nous appellerons, par définition, résistance interne du tube diode le quotient : $\frac{1}{\text{tg } \alpha}$

$$\rho = \frac{1}{\text{tg } \alpha}$$

Détermination pratique de la résistance interne.

Fixons la tension plaque à une première valeur U_{p1} : il y correspond un courant d'intensité I_{p1} , qui constitue l'ordonnée du point figuratif P_1 , dont l'abscisse est U_{p1} .

En faisant passer U_p à U_{p2} , I_p passe à I_{p2} et le point figuratif vient en P_2 . Les accroissements de U_p et de I_p sont donc :

$$\Delta U_p = U_{p2} - U_{p1}$$

$$\Delta I_p = I_{p2} - I_{p1}$$

Il est donc évident que le coefficient angulaire de la partie caractéristique est bien donnée par :

$$\rho = \frac{\Delta U_p}{\Delta I_p} = \frac{1}{\text{tg } \alpha}$$

Remarque :

Il apparaît que ρ caractérise parfaitement la résistance interne de la lampe, puisque le quotient $\frac{\Delta U_p}{\Delta I_p}$ est le même quel que soit U_{p1} et U_{p2} (dans la partie rectiligne de la caractéristique).

Notes additionnelles.

a) Temps de transit " cathode - anode " .

On appelle temps de transit électronique ou temps de parcours, le temps que mettent les électrons à franchir la distance cathode-anode. Ce temps de transit est évidemment d'autant plus bref que la distance anode-cathode est plus petite, que la tension anodique est plus élevée.

En moyenne le temps de transit électronique s'établit aux environs du millième de micro-seconde (10^{-9} s)

b) Dissipation thermique de l'anode.

La source de tension plaque fournit au tube une certaine puissance sous force électrique :

$$P = U_p \cdot I_p$$

Cette puissance est entièrement transformée sous forme thermique lors du choc des électrons sur la plaque ; l'énergie thermique ainsi mise en jeu augmente la température de l'anode.

Dans ces conditions, on appelle dissipation thermique anodique, le phénomène en question. Il s'agit en définitive d'une véritable dégradation d'énergie ; en effet, l'énergie initialement sous forme électrique, prend d'abord la forme cinétique lorsqu'elle contribue à accélérer les électrons, et prend enfin la forme thermique.

c) Les tubes modernes sont équipés pour la plupart de cathodes à oxydes (voir p.40). Il est très important de noter qu'avec de telles cathodes, la zone de saturation ne peut pas être observée, le courant plaque augmentant avec la tension plaque jusqu'à destruction de la cathode.

IV - LE TUBE TRIODE

Constitution.

Le tube triode est constitué de 3 électrodes : la cathode, la grille et l'anode ; ces électrodes sont situées à l'intérieur d'une enceinte hermétiquement close en verre ou en acier et dans laquelle règne un vide très poussé.

La cathode est généralement rectiligne et constituée d'un filament pouvant être porté à l'incandescence par la circulation d'un courant suffisamment intense, dit courant de chauffage. La plaque est cylindrique et coaxiale à l'égard du filament (elle est en nickel, en tantale ou en molybdène). Enfin la grille située entre le filament et l'anode se présente sous la forme d'un grillage cylindrique en fil de nickel, elle est coaxiale vis-à-vis de l'anode et du filament.

En définitive la triode diffère de la diode par la présence d'une électrode supplémentaire discontinue, située entre le filament et l'anode à travers laquelle peuvent circuler les électrons. L'ensemble des électrodes est maintenu rigidement à l'aide de ponts et d'entretoises isolants ou conducteurs suivant les cas.

Tube triode (type tout verre)

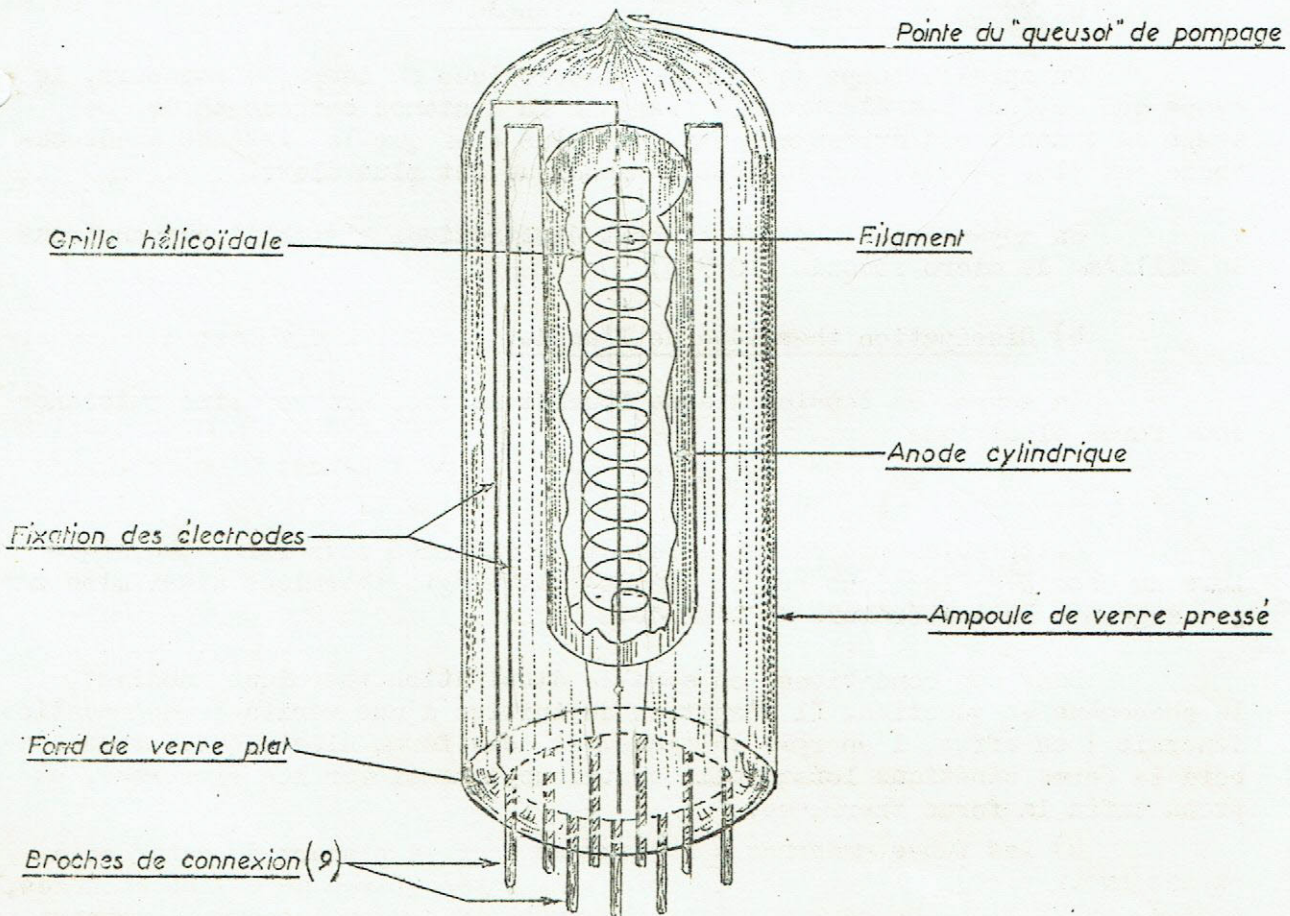
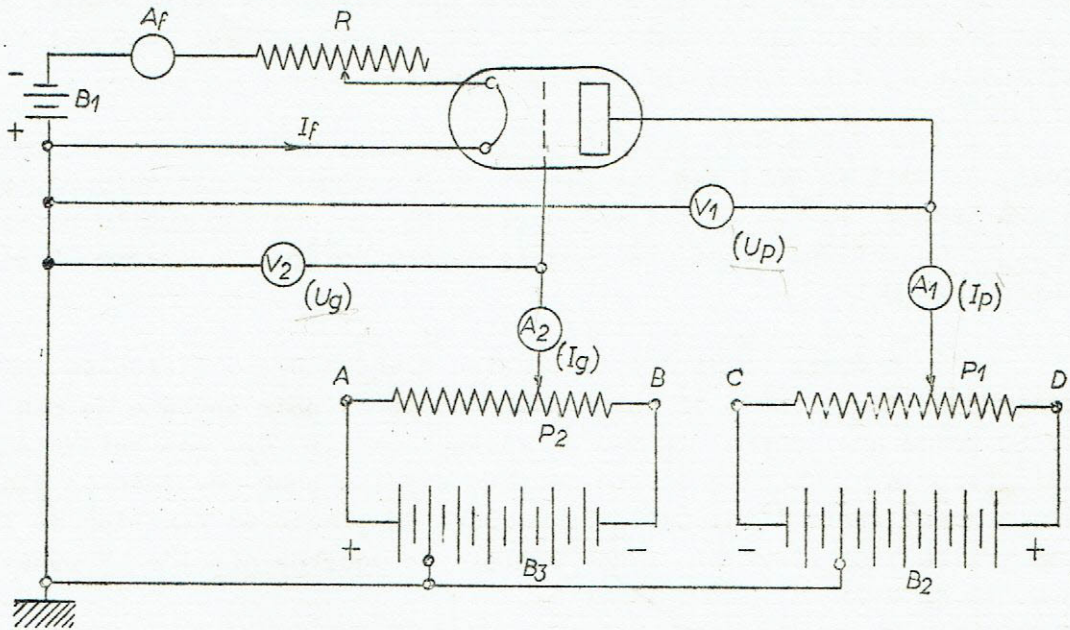


Schéma du montage expérimental destiné à l'étude.



Il s'agit d'étudier expérimentalement comment varie le courant plaque d'un tube triode en fonction des 2 variables principales suivantes : la tension de grille U_g et la tension de plaque U_p ; éventuellement on pourra introduire une troisième variable : l'intensité de chauffage du filament I_f .

Il convient donc de pouvoir faire varier séparément les 3 grandeurs en question.

La batterie B_1 assure l'incandescence du filament et le rhéostat R permet de faire varier l'intensité du courant de chauffage, mesurée par l'ampèremètre A_f .

La batterie B_2 ou, batterie de haute tension est destinée à porter la plaque à une tension positive vis-à-vis du filament ; le potentiomètre P_1 permet de faire varier cette tension d'une façon progressive tandis que l'ampèremètre A_1 et le voltmètre V_1 mesurent respectivement l'intensité du courant de plaque et la tension de plaque vis-à-vis du filament.

Enfin la batterie B_3 livre la tension continue, variable grâce à P_2 , et qui polarise ainsi négativement ^{ou positivement} la grille vis-à-vis du filament ; A_2 et V_2 mesurent l'intensité du courant de grille et la tension de grille.

Etude expérimentale du tube triode.

On suppose les appareils de mesure parfaits, c'est-à-dire les ampèremètres dénués de résistance et les voltmètres pourvus d'une résistance infinie.

Etant donné la présence de 2 variables, la tension de plaque U_p et celle de grille U_g , il ne serait pas intéressant de faire varier simultanément les valeurs des potentiomètres AB et CD. C'est pourquoi l'étude expérimentale du tube triode s'effectue par deux séries de mesure :

1°) On donne à la tension de grille U_g différentes valeurs successives, de volt en volt par exemple et pour chacune de ces valeurs, on trace une courbe $I_p U_p$ en faisant varier U_p par action sur le potentiomètre CD. On obtient ainsi une famille de courbes appelée encore "réseau de courbes $I_p U_p$ ".

2°) On donne ensuite à la tension plaque U_p différentes valeurs successives de 50 volts en 50 volts par exemple et pour chacune de ces valeurs, on trace une courbe $I_p U_g$ en faisant varier U_g par action sur le potentiomètre AB. Chacune de ces courbes exprime pour une tension plaque donnée, comment varie l'intensité du courant de plaque en fonction de la tension grille ; on élève ainsi une famille de courbes appelée "réseau de courbes $I_p U_g$ ".

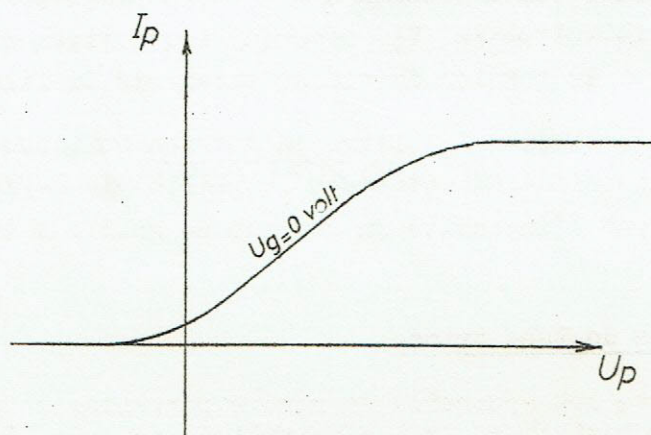
Remarque :

Ces mesures sont évidemment effectuées à intensité filament constante.

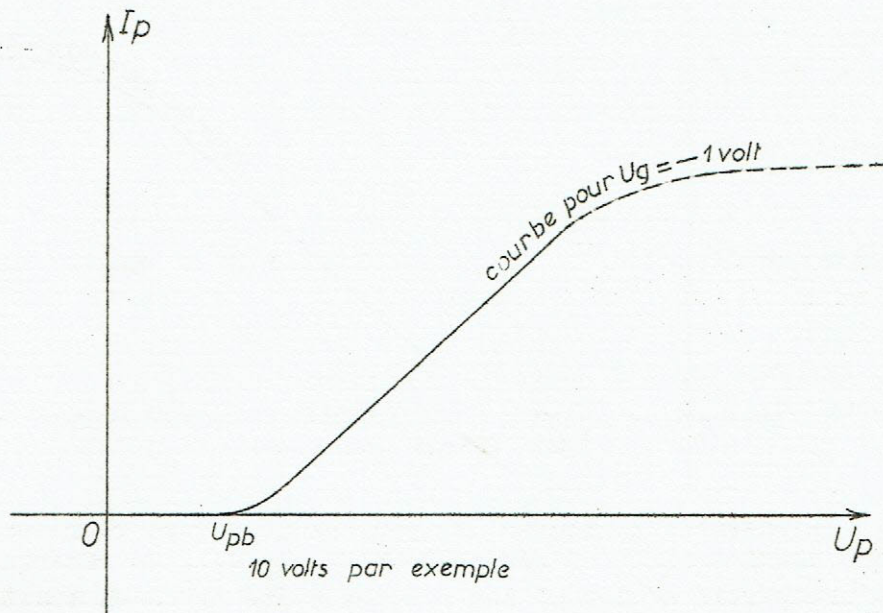
Ainsi la saturation est atteinte dans tous les cas pour la même intensité filament.

Réseau de courbes $I_p U_p$ d'un tube triode.

a) Fixons la tension de grille à 0 volt et faisons varier la tension de plaque. On obtient ainsi une courbe caractéristique $I_p U_p$ valable pour $U_g = 0$ volt. Cette courbe est identique à celle d'une diode : courbure inférieure, région rectiligne, courbure supérieure, palier de saturation. En pratique on peut considérer qu'elle part de l'origine des axes des coordonnées.

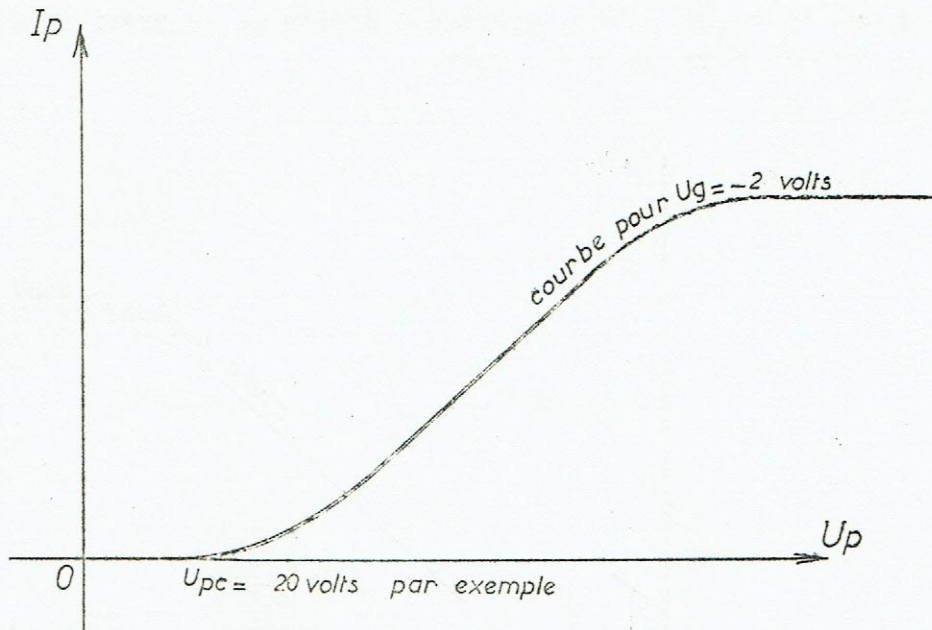


b) Fixons la tension de grille à une certaine valeur négative U_g (- 1 volt, par exemple); en agissant sur le potentiomètre C D on peut tracer une nouvelle courbe déportée à droite de la première et dite courbe $I_p U_p$ valable pour $U_g = - 1$ volt.

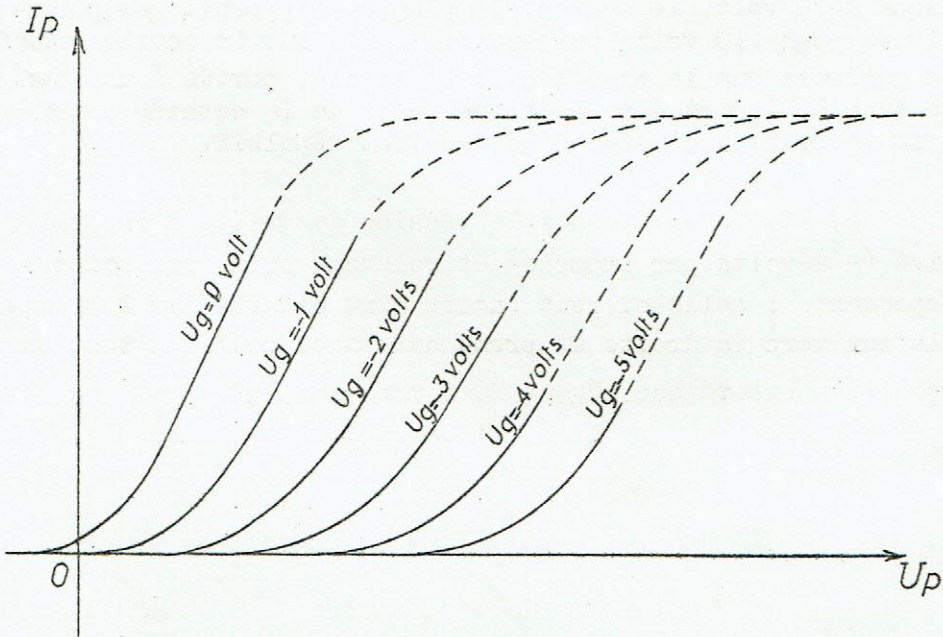


On constate, qu'au lieu d'apparaître sensiblement pour une tension de plaque de 0 volt, le courant de plaque n'apparaît que pour une tension supérieure U_{pb} (10 volts par exemple) mais que la courbe conserve la même allure générale que la précédente. La grille, portée à une tension négative exerce donc à l'égard des électrons issus de la cathode un effet opposé à celui de la plaque, c'est-à-dire un effet répulsif.

c) Fixons maintenant la tension de grille à une valeur encore plus négative (- 2 volts par exemple) et relevons point par point la courbe $I_p U_p$ correspondante ; celle-ci peut encore être déduite des 2 premières par une translation vers la droite et prend naissance pour une tension de plaque U_{pb} plus positive encore que U_{pb} (20 V par exemple).



L'ensemble de toutes les courbes peut être représenté sur un même graphique donnant ainsi un réseau complet $I_p U_p$. On remarquera sur le réseau qu'une partie seulement des courbes a été tracée en traits pleins. C'est cette partie seulement qu'il est possible de relever avec des tubes modernes. En pointillé, la suite des courbes qu'il serait possible d'obtenir avec des triodes spéciales.

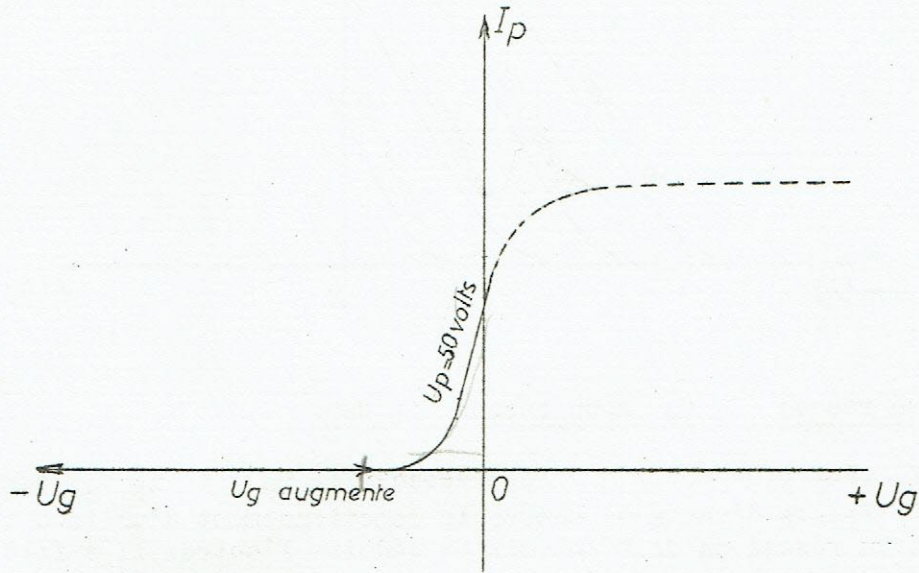


On remarquera également que la tension grille a toujours été maintenue constante, soit nulle ou négative dans les expériences précédentes. A aucun moment A_2 n'enregistra le passage d'un courant. En d'autres termes,

il n'y eût jamais de courant grille. On verra plus loin que le courant grille est généralement nuisible et que d'autre part le rôle de la grille est de commander le courant plaque et non pas d'en consommer.

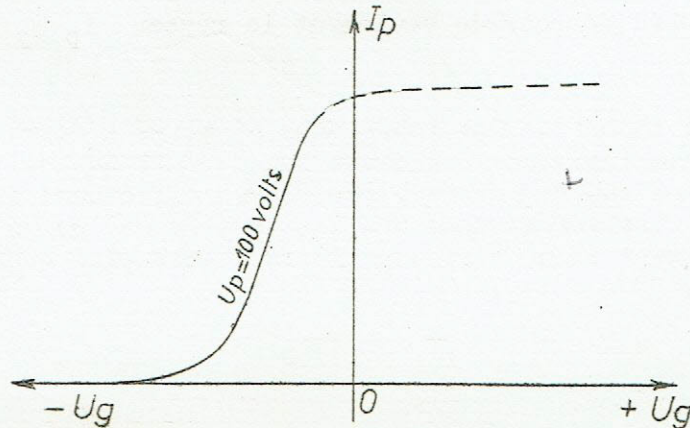
Réseau de courbes I_p U_g d'un tube triode.

a) Fixons U_p à une certaine valeur positive (50 V par exemple) faisons varier U_g d'une valeur très négative pour laquelle il n'y aurait pas de courant plaque et augmentons progressivement U_g . On relève des variations de courant plaque, ce qui donne une première courbe I_p U_g que l'on trace généralement jusqu'à $U_g = 0$ mais que l'on peut prolonger jusqu'à la saturation.



b) Augmentons U_p (100 v)

La plaque étant plus positive produira pour chaque valeur de U_g un courant de valeur supérieure à celle qui était obtenue pour $U_p = 50$ v. Tout se passe comme si la courbe avait glissé vers la gauche. Le chauffage n'ayant pas changé l'intensité de saturation reste la même.

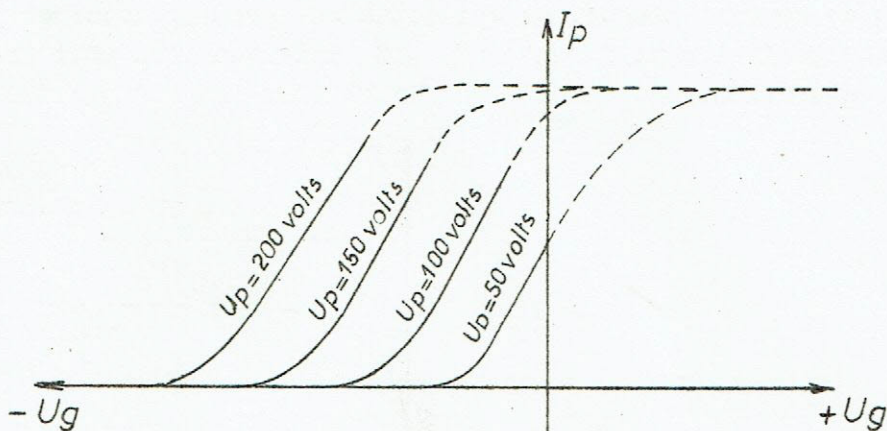


c) En continuant l'expérience et en prenant les valeurs de U_p de plus en plus positives on obtient toute une famille de courbes caractéristiques : " le réseau $I_p U_g$ " .

Remarque :

Seule la partie des courbes tracée en trait plein dans le graphique ci-dessous est relevée en pratique.

Les valeurs de U_g par lesquelles le courant s'annule s'appellent les tensions de " Cut off " du tube.



Passage d'un réseau $I_p U_p$ à un réseau $I_p U_g$.

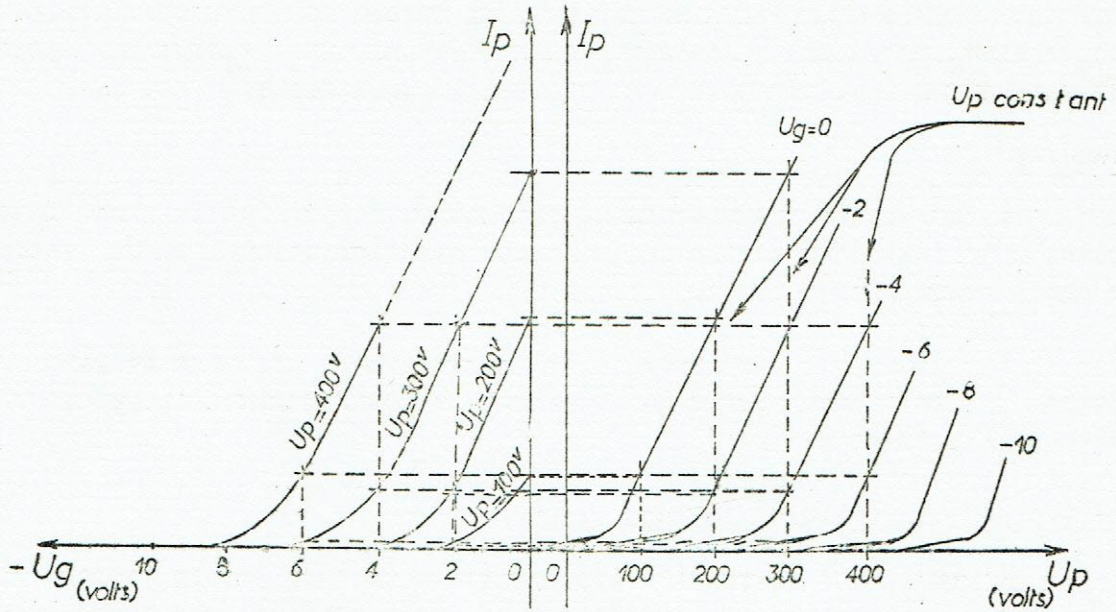
Il faut bien noter que les réseaux $I_p U_p$ et $I_p U_g$ sont deux aspects différents d'une même chose; le fonctionnement d'un tube triode. Connaissant un réseau on doit pouvoir en déduire l'autre. Il suffit de reporter point par point les caractéristiques d'un réseau dans l'autre ayant soin de garder U_p constant si on passe du réseau $I_p U_p$ au réseau $I_p U_g$. Inversement il faudra garder U_g constant si on passe du réseau $I_p U_g$ au réseau $I_p U_p$.

Exemple :

Graphique montrant comment on peut obtenir les courbes du réseau $I_p U_g$ quand on possède seulement le réseau $I_p U_p$.

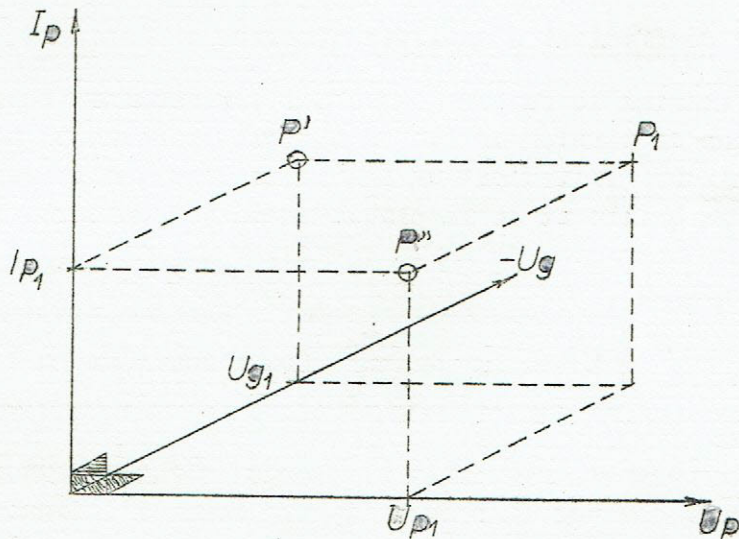
TRES IMPORTANT :

L'étude théorique des tubes nous a obligé à faire mention du phénomène de saturation. Nous insistons à nouveau sur le fait que ce phénomène ne peut pas s'observer avec les tubes modernes. Les élèves effectuant des relevés de courbes en laboratoire n'observeront donc les parties en traits pleins. Dans les paragraphes qui suivent il ne sera d'ailleurs jamais plus question de la " zone de saturation " .



Surface caractéristique du tube triode.

Toute l'étude précédente montre que le courant plaque est une fonction de deux variables indépendantes : U_p et U_g . Pour simplifier les tracés nous avons pris successivement des valeurs constantes pour une des deux variables. Mais en réalité la fonction $I_p = f(U_p, U_g)$ ne peut être représentée graphiquement que par une surface appelée " surface caractéristique " du tube. Pour le tracé de cette surface il faut 3 axes établis dans l'espace comme les 3 arêtes d'un trièdre tri-rectangle.



Pour une valeur déterminée de la tension plaque U_{p1} et de la tension grille U_{g1} , l'intensité plaque I_p prend une valeur I_{p1} . Cette

valeur est définie dans l'espace par P_1 . Il existe une infinité de valeurs de U_p et U_g permettant d'établir dans l'espace une infinité de points P . L'ensemble de ces points constitue la surface caractéristique du tube.

Remarque :

Le point P' représente la projection de P sur le plan $I_p U_g$. Le point P' fait donc partie de la courbe caractéristique $I_p U_g$ valable pour une tension plaque U_{p1} .

Le point P'' correspond à la projection de P_1 sur le plan $I_p U_p$. Le point P'' fait donc partie de la courbe caractéristique $I_p U_p$ pour une tension grille égale à U_{g1} .

Grandeurs caractéristiques du tube triode.

L'examen des propriétés fondamentales du tube triode (action de U_p et U_g sur I_p) conduit à faire intervenir trois coefficients fondamentaux qui caractérisent le fonctionnement du tube, en mesurant ou en comparant numériquement les actions de U_p et de U_g sur I_p . Ces grandeurs sont :

- a) le coefficient d'amplification ou pouvoir amplificateur (K ou μ)
- b) la pente ou inclinaison ou transconductance (S ou p).
- c) la résistance interne ou résistance intérieure (ρ ou R_i)

On donnera pour chacune de ces grandeurs la définition, la formule avec des unités et la manière d'en effectuer le calcul sur le réseau $I_p U_p$ sur le réseau $I_p U_g$.

1°) Coefficient d'amplification.

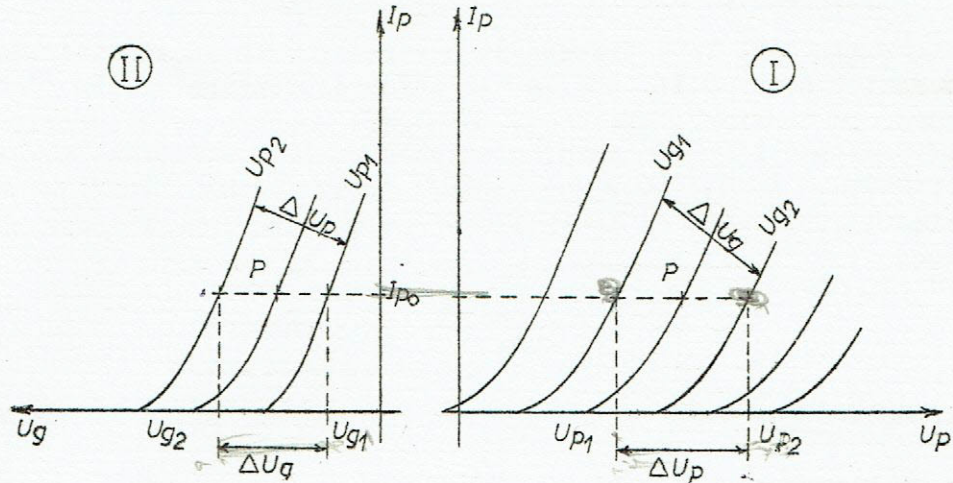
Il exprime le rapport entre une variation de tension plaque ΔU_p et la variation de tension grille ΔU_g qui provoque la même variation de l'intensité plaque I_p . C'est un nombre qui exprime le rapport entre les efficacités de la grille et de la plaque en ce qui concerne la commande du courant plaque.

On a donc :

$$K \text{ ou } \mu = \frac{\Delta U_p}{\Delta U_g} \quad (\text{pour une même } \Delta I_p)$$

Pour obtenir cette valeur, on peut effectuer un calcul graphique sur le réseau $I_p U_p$ ou sur le réseau $I_p U_g$ comme l'indiquent les graphiques

Ⓘ et Ⓢ.

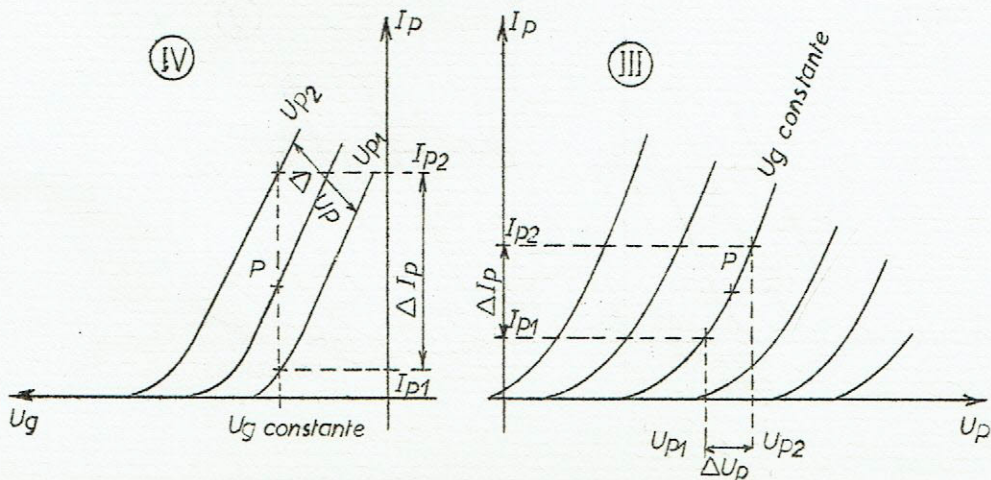


2°) Résistance interne.

La résistance interne d'un tube triode est définie par le quotient d'une variation de tension plaque ΔU_p par la variation de courant plaque ΔI_p correspondante, la tension grille étant maintenue constante. On peut dire également que la résistance interne représente la résistance ohmique offerte par le tube au passage du courant alternatif. On a :

$$R_i \text{ ou } \rho = \frac{\Delta U_p}{\Delta I_p} \text{ à } U_g \text{ constante} \begin{cases} \rho & \text{en ohms} \\ \Delta U_p & \text{en volts} \\ \Delta I_p & \text{en ampères} \end{cases}$$

Les graphiques (III) et (IV) montrent comment déterminer la résistance interne à l'aide du réseau $I_p U_p$ ou du réseau $I_p U_g$. On notera que le calcul graphique doit être effectué dans une zone où les caractéristiques sont sensiblement linéaires (de part et d'autre du point P).



3°) Pente, inclinaison ou transconductance.

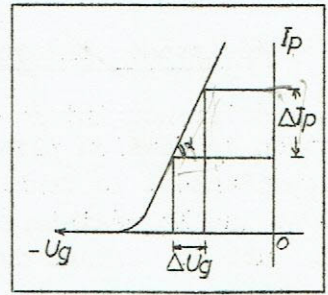
La pente d'un tube triode est mesurée par le quotient d'une variation de courant plaque ΔI_p par la variation de tension grille ΔU_g qui l'a provoquée, la tension plaque étant maintenue constante. Géométriquement la pente représente l'inclinaison, c'est-à-dire le coefficient angulaire de la caractéristique $I_p U_g$ pour une tension plaque donnée. Physiquement la pente exprime l'efficacité de la grille en ce qui concerne la commande du courant plaque.

$$p \text{ ou } S = \frac{\Delta I_p}{\Delta U_g} \text{ à } U_p \text{ constante}$$

S en ampères par volt si ΔI_p est en ampères et ΔU_g en volts

S en milliampères par volt si ΔI_p est en mA et ΔU_g en V.

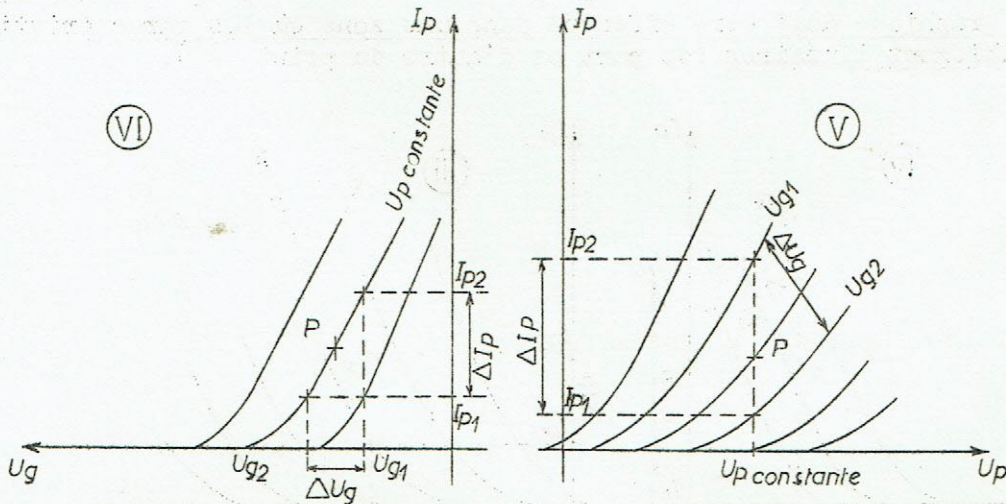
Sur les catalogues anglais ou américains, la pente est désignée par le mot transconductance. En effet, le quotient d'une intensité par une tension est homogène à une conductance. On l'exprime alors en mho (ou en Siemens). On notera que : 1 mho = 1 A/V



donc :

1 mA/V = 1 millimho ou 1000 micromhos ($\mu\Omega$).

Les deux graphiques (V) et (VI) montrent comment déterminer la pente sur un réseau $I_p U_p$ ou $I_p U_g$.



Ordre de grandeur des paramètres K, ρ et S.

Le coefficient d'amplification K est de l'ordre de 20 à 30 (valeurs extrêmes de 5 ou 6 à 70-80).

La résistance interne ρ est d'environ 10000 à 20000 Ω (valeurs extrêmes 1000 à 50000 Ω).

La pente est de l'ordre de 1 à 2 mA/V (valeurs extrêmes de 0,5 à 5 ou 6 mA/V).

Relation fondamentale de Barkhausen.

On a :
$$K = \rho \cdot S \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho \text{ en } \Omega \\ S \text{ en } \text{A/volt} \end{array} \right.$$

Démonstration.

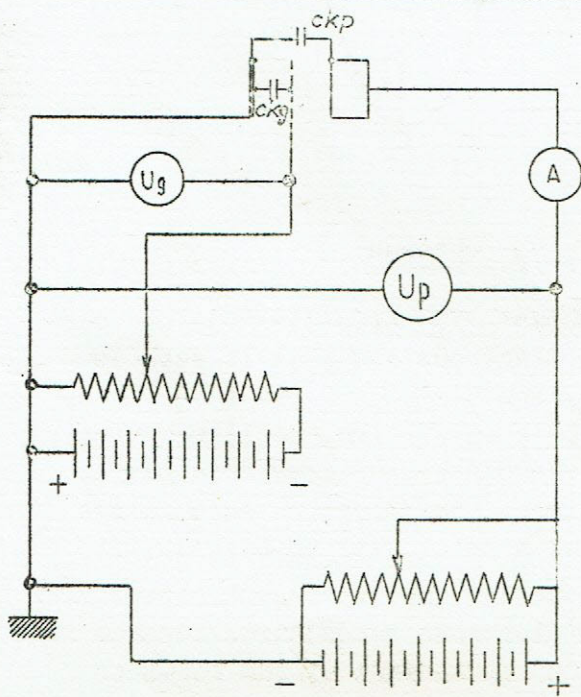
On a $\rho = \frac{\Delta U_p}{\Delta I_p}$; conservons la même variation ΔI_p pour définir la pente $S = \frac{\Delta I_p}{\Delta U_g}$. On a :

$$\rho \times S = \frac{\Delta U_p}{\Delta I_p} \times \frac{\Delta I_p}{\Delta U_g} = \frac{\Delta U_p}{\Delta U_g}$$

Mais ici ΔU_p et ΔU_g entraînent précisément, par définition la même ΔI_p , ce qui est conforme à la définition de K ; d'où :

$$\rho \times S = K$$

Interprétation électrostatique de K.



Un condensateur chargé à une tension U emmagasine une quantité d'électricité $Q = C U$. S'il se produit une variation de tension ΔU , la variation de charge a pour valeur $\Delta Q = C \cdot \Delta U$.

Si l'on considère une triode dont on veut mesurer le coefficient K, on fait d'abord varier la tension grille d'une quantité ΔU_g : la capacité inter électrodes " cathode grille " subit une variation de charge :

$$\Delta Q_{CKg} = C_{Kg} \cdot \Delta U_g \quad (1)$$

En faisant varier U_g on a modifié I_p . Faisons varier maintenant U_p de manière à redonner au courant sa valeur initiale. La variation de charge subie par la capacité C_{Kp} sera :

$$\Delta Q_{CKp} = C_{Kp} \cdot \Delta U_p \quad (2)$$

Les 2 variations de charge ayant le même effet sur le courant on peut évaluer les relations (1) et (2); on obtient :

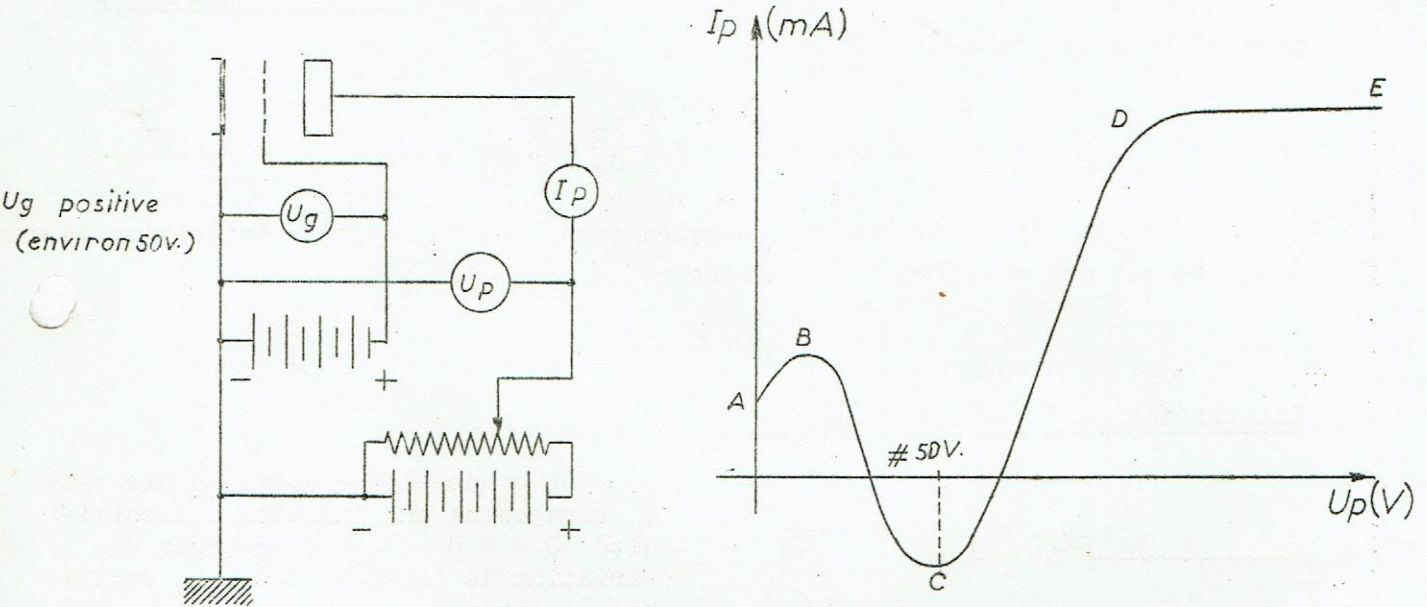
$$C_{Kg} \cdot \Delta U_g = C_{Kp} \cdot \Delta U_p$$

$$\frac{\Delta U_p}{\Delta U_g} = \frac{C_{Kg}}{C_{Kp}} = K$$

Conclusion.

Le coefficient d'amplification est une constante dont la valeur dépend uniquement de la géométrie des électrodes ; K étant constant il ne faut pas conclure que ρ et S sont constants également. Ces 2 grandeurs varient en sens inverse, ce qui explique que leur produit soit constant.

Tube triode fonctionnant avec grille positive ; " effet dynatron ".



Interprétation électronique de la courbe I_p U_p obtenue.

Au point A, $U_p = 0$, mais le courant I_p présente déjà une certaine valeur, due à l'énergie cinétique des électrons issus de la cathode qui traversent la grille et arrivent ainsi jusqu'à l'anode. De A à B U_p augmente ainsi que I_p , ce qui est normal. Au point B malgré l'augmentation de U_p , I_p décroît ; cela provient des électrons secondaires émis par la plaque par suite du choc des électrons primaires. Les électrons secondaires se dirigent vers l'électrode la plus positive c'est-à-dire vers la grille, tant que U_p est plus petit que U_g . On constate que le courant plaque peut s'annuler et même s'inverser si le nombre d'électrons secondaires dépasse le nombre d'électrons primaires. Entre C et D le courant plaque augmente

rapidement car U_p a dépassé U_g et tous les électrons secondaires reviennent désormais sur la plaque. On atteint enfin la saturation dans la zone D E. Courant de grille (voir page 34 bis).

Notion de résistance négative.

Dans la zone B C, on constate qu'une augmentation de U_p produit une diminution de I_p , ce qui est contraire à la loi d'Ohm. Si on calcule la résistance interne du tube dans cette région, on a :

$$\rho = \frac{+\Delta U_p}{-\Delta I_p}$$

On trouve donc une résistance négative. On verra que cette résistance peut servir pour annuler la résistance positive de certains circuits.

On ne peut pas relever la caractéristique dynatron de n'importe quel tube triode : pour éviter l'arrachement de la matière émissive, il faut une cathode en Wolfram pur, et pour résister au bombardement des électrons la grille doit être de préférence, en molybdène.

Courbes et surfaces caractéristiques idéales.

La surface caractéristique d'un tube triode idéal serait rigoureusement plane et passerait par l'origine des axes de coordonnées. Il en résulterait :

- a) Une parfaite linéarité des courbes caractéristiques $U_p I_p$ et $I_p U_g$.
- b) Un parfait parallélisme entre ces courbes.
- c) Une parfaite équidistance sur les deux réseaux.

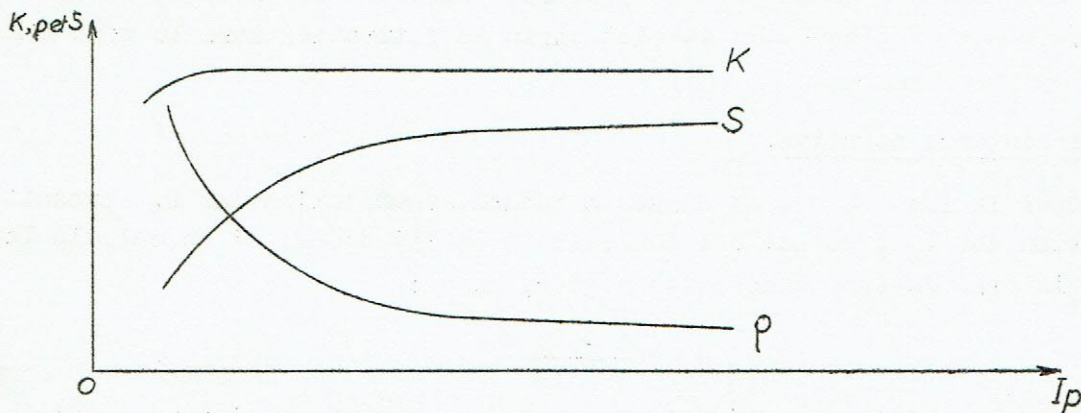
Mais en réalité, il existe un gauchissement de la surface caractéristique, imprimant des coudes aux courbes, notamment dans leurs régions inférieures. Dans ces conditions, les courbes ne sont plus rigoureusement rectilignes, parallèles et équidistantes.

Constance des paramètres caractéristiques.

Dans un tube triode idéal, K , ρ et S doivent être indépendants de I_p , U_p et U_g . En raison du caractère gauche de la surface caractéristique, il n'en est pas ainsi et l'on constate quelques variations affectant surtout S et ρ . Le produit $\rho S = K$ reste sensiblement constant.

Variations de K , ρ et S .

Comme il a été indiqué précédemment, les grandeurs ρ et S varient en sens inverse tandis que le coefficient K demeure constant tant que le courant plaque n'atteint pas de trop faibles valeurs. Le graphique montre les variations relatives de K , ρ et S en fonction du courant plaque pour un tube triode.



Equation caractéristique du tube triode.

Relation de Vallaury :

$$\rho I_p = K U_g + U_p - U_0$$

valable pour $I_p > 0$

I_p : courant plaque en ampères.

U_g : tension grille et U_p tension plaque en volts.

ρ : résistance interne en ohms et K sans unité.

U_0 : constante qui s'exprime en volts, qui dépend du tube considéré et qu'on appelle " constante de Vallaury ". Dans certains cas, ce dernier terme est $+ U_0$; c'est une question de convention.

La relation de Vallaury n'est valable que dans les régions rectilignes des caractéristiques $I_p U_p$.

Equation de la triode en régime transitoire.

En fonctionnement, les tensions plaque et grille ainsi que le courant plaque du tube triode varient en permanence. A un instant donné, ces tensions et courants prennent des valeurs particulières appelées valeurs instantanées ; elles seront désignées par i_p , u_g et u_p . Ces valeurs correspondent à un régime appelé régime transitoire et on verra que la relation de Vallaury leur est applicable. On aura à chaque instant :

$$\rho i_p = K u_g + u_p - U_0$$

COURANT DE GRILLE

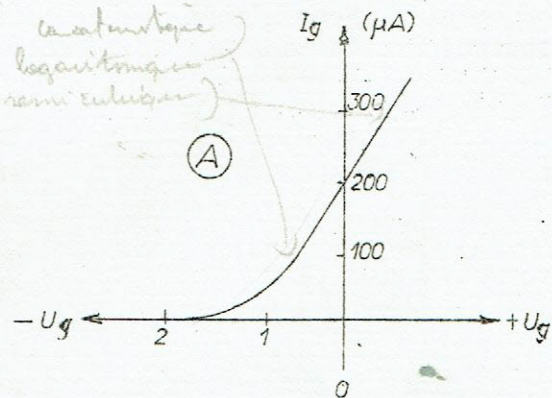
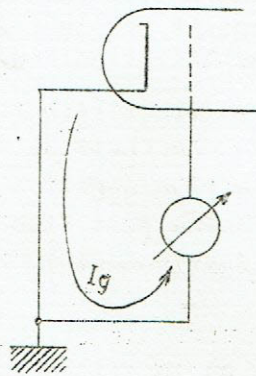
D'une manière générale, on admet qu'un tube fonctionne sans courant grille lorsque la grille est portée à un potentiel négatif par rapport à la cathode. Toutefois, il existe pratiquement toujours un courant de grille et on doit en connaître les origines.

1°) Courant grille direct ou normal.

Lorsque la grille est négative, elle repousse les électrons qui sont émis par la cathode. Toutefois, certains de ces électrons pourront tout de même atteindre la grille :

- s'ils sont doués d'une énergie cinétique suffisante.
- si le potentiel de grille n'est pas très négatif (moins de $-1,5$ volt).
- si le potentiel de grille est positif.

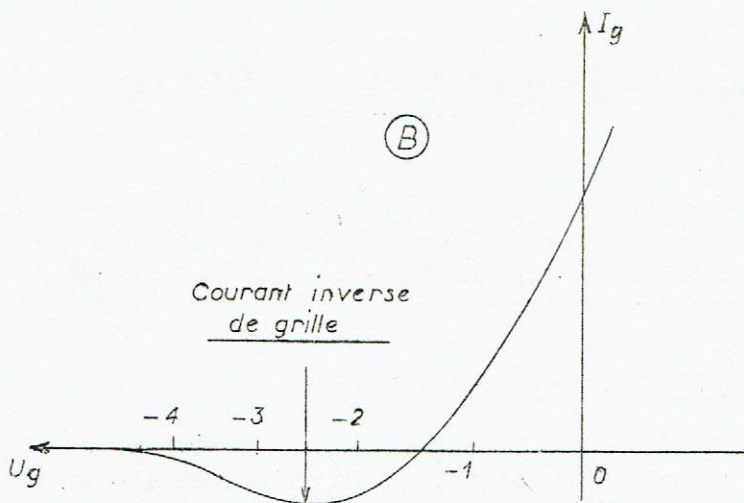
Dans ces conditions, il y a un courant de grille direct dont l'ordre de grandeur est indiqué par la courbe (A).



2°) Courant inverse de grille.

La grille n'étant pas "émettrice d'électrons", le courant inverse s'explique par le fait que la grille reçoit des charges positives (ions positifs).

L'apparition des ions s'explique par le fait qu'un tube n'est jamais parfaitement vidé ; les molécules de gaz résiduel sont heurtées par les électrons en provenance de la cathode et perdent à leur tour des électrons, ce qui les rend positives. Les molécules ionisées positivement se dirigent vers l'électrode la plus négative, c'est-à-dire la grille de commande.

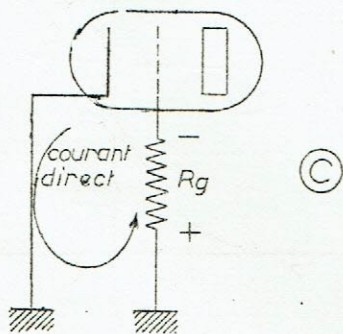


Plus la grille est négative, plus les ions sont attirés et par conséquent, plus le courant inverse est intense (voir courbe (B)).

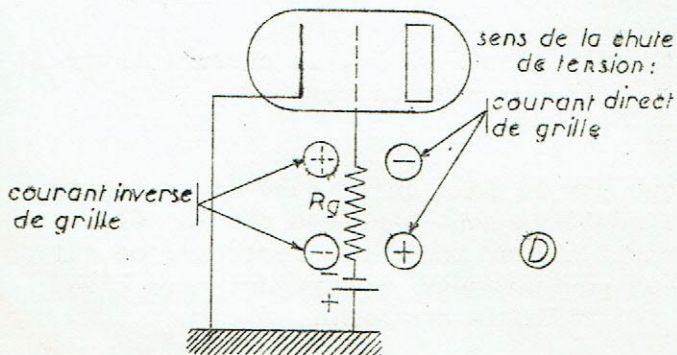
Cependant, si la tension grille augmente encore en valeur négative, on constate que le courant inverse diminue et finalement s'annule. Cela provient de la diminution du courant plaque qui entraîne une diminution de l'ionisation. Lorsque $I_p = 0$ (point de cut-off), il n'y a plus d'ionisation possible d'où un courant inverse nul.

Effets du courant grille.

Ils sont assez nombreux et nous les étudierons chaque fois que cela sera nécessaire. Nous n'indiquerons ici que l'effet produit par le passage d'un courant grille dans une résistance placée entre grille et cathode.



Le courant grille direct (figure (C)) produit dans R_g une chute de tension rendant la grille plus négative que la cathode. Ce phénomène peut être utilisé pour polariser négativement la grille (voir page 51).

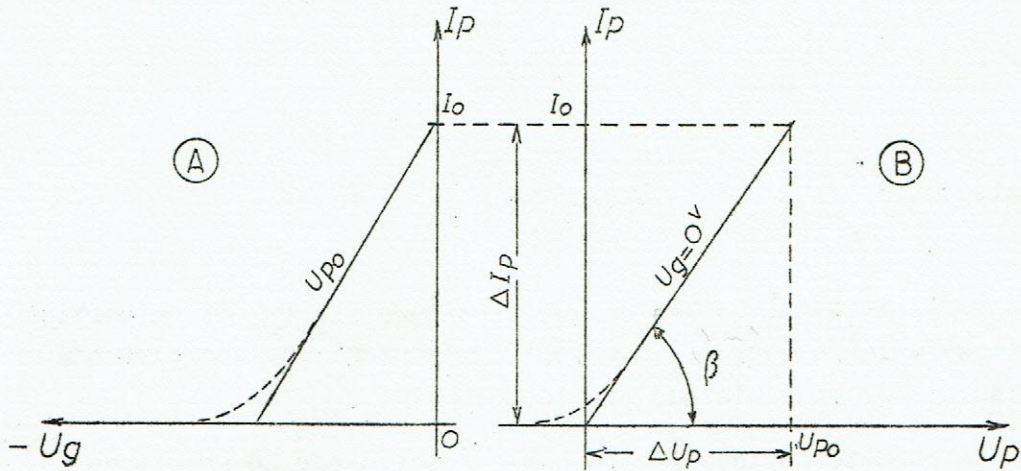


Dans le cas où la grille est déjà rendue négative par un générateur (fig (D)), la chute de tension aux bornes de R_g viendra modifier la différence de potentiel entre grille et cathode.

S'il s'agit d'un courant direct, la tension négative entre grille et cathode sera augmentée. S'il s'agit d'un courant inverse, cette tension sera diminuée.

Dans les deux cas, cette modification peut amener des inconvénients qui seront examinés en temps utile.

Démonstration graphique de la relation de Vallaury.



1) Fixons la tension plaque d'un tube triode dont les grandeurs K , ρ et S sont connues à une certaine valeur U_{p0} et traçons la courbe caractéristique $I_p U_g$ valable pour la tension U_{p0} (courbe (A)).

L'équation de la partie rectiligne de la courbe est de la forme $y = a x + b$ soit ici : $I_p = S U_g + I_0$. $s = \frac{\Delta I_p}{\Delta U_g}$

Les valeurs de I_p et de U_g étant variables dans le temps, on écrira :

$$\boxed{i_p = S u_g + I_0} \quad (1)$$

2) Traçons la caractéristique $I_p U_p$ de cette triode valable pour $U_g = 0$ volt. On considère la partie rectiligne de cette caractéristique que l'on fait passer par l'origine (courbe (B)).

Sur ce graphique on voit que : $\text{tg } \beta = \left| \frac{I_0}{U_{p0}} \right|$, mais on peut poser:

$$I_0 = \Delta I_p + 0$$

$$U_{p0} = \Delta U_p + 0$$

d'où : $\text{tg } \beta = \frac{I_0}{U_{p0}} = \frac{\Delta I_p}{\Delta U_p} = \frac{1}{\rho}$

finalement on obtient : $I_0 = \frac{U_{p0}}{\rho}$

L'équation (1) devient : $I_p = S U_g + \frac{U_{p0}}{\rho}$

Soit pour une valeur quelconque de la tension plaque :

$$i_p = S u_g + \frac{u_p}{\rho}$$

ou : $\rho i_p = \rho S u_g + \frac{u_p}{\rho} \cdot \rho$

finalement : $\rho i_p = K u_g + u_p$ (2)

3) En réalité toutes les caractéristiques $I_p U_p$ et en particulier celle qui est valable pour $U_g = 0$ volt présentent une courbure inférieure appréciable dont nous n'avons pas tenu compte.

La caractéristique réelle est respectée sur le graphique (C) par la courbe α' et non α comme on avait supposé précédemment.

Le point U_{p0} est en réalité l'abscisse du point P' et non l'abscisse du point P.

Appelons U_0 la différence entre les 2 abscisses et on a maintenant :

$$U_{p0} = \Delta U_p + U_0$$

D'autre part on sait que : $I_0 = \frac{\Delta U_p}{\rho}$

soit en tirant ΔU_p de la relation précédente :

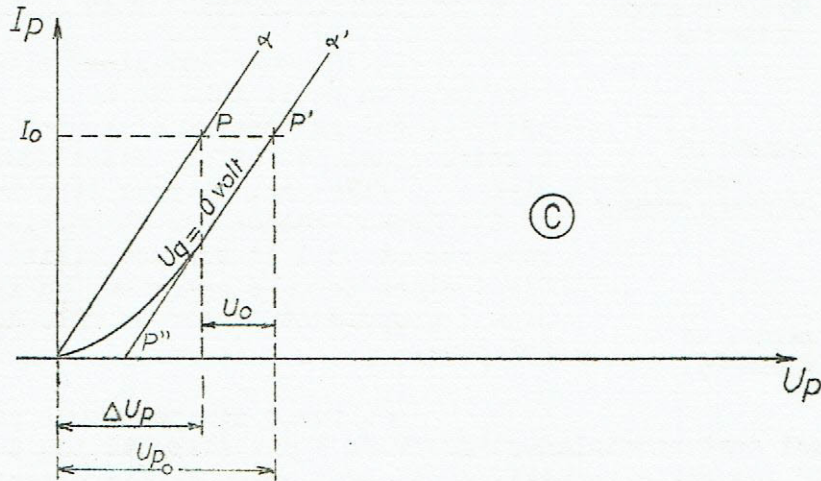
$$\Delta U_p = U_{p0} - U_0$$

d'où : $I_0 = \frac{U_{p0} - U_0}{\rho}$

En reportant la valeur de I_0 dans la relation (1) et en faisant le même calcul que précédemment, on trouvera non plus la relation (2) mais la relation de Vallaury, soit :

$$\rho i_p = K u_g + u_p - U_0$$

On remarque sur le graphique (C), l'interprétation physique de U_0 : c'est l'abscisse du point d'intersection de l'axe des U_p et du prolongement de la partie rectiligne de la caractéristique $I_p U_p$ valable pour $U_g = 0$ volt. (point p").



Classification des différents tubes.

On peut établir plusieurs types de classification :

1°) Selon l'organisation et l'objet de l'installation qu'ils équipent.

a) Tubes de réception : Mettant en jeu une puissance de quelques watts au maximum et principalement utilisés dans les récepteurs radio-électriques ainsi que dans les petits amplificateurs électroniques.

b) Tubes d'émission : Mettant en jeu des puissances comprises entre quelques watts et quelques centaines de kilowatts.

2°) Selon la constitution interne :

- a) Diode
- b) Triode
- c) Tétrode (lampe à 4 électrodes).
- etc...

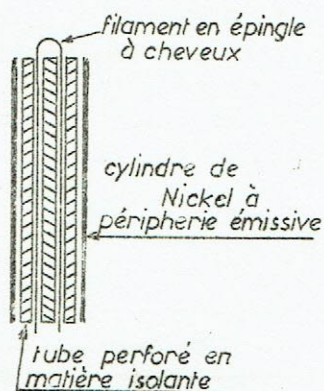
En général chaque fonction nécessite un type de tube approprié.

3°) Selon les conditions de chauffage.

a) Tubes à chauffage direct.

Ce sont des tubes dans lesquels le filament joue un double rôle : chauffage et émission électronique .

Ces tubes sont destinés à être chauffés à l'aide d'une source de courant continu (piles ou accumulateurs).



b) Tubes à chauffage indirect.

Le filament est alors situé à l'intérieur d'un petit tube de nickel dont il est isolé et qui est chargé d'assurer l'émission électronique ; en effet, étant donné sa proximité du filament, il peut être lui-même porté à l'incandescence par ce dernier grâce au rayonnement et à la conductibilité thermique. C'est alors le tube extérieur au filament qui joue à proprement parler le rôle de cathode émissive.

Les tubes équipés d'une cathode à chauffage indirect sont spécialement destinés à une alimentation du filament par une source de courant alternatif ; en effet grâce à l'importante inertie thermique du cylindre de nickel entourant le filament, les variations à rythme rapide de la température de ce dernier, et qui sont imputables au caractère alternatif du courant de chauffage, ne sont pas transmises à la surface émissive. Il en résulte donc une grande constance du flux électronique et l'absence de tout ronflement naturel.

Éléments constitutifs communs aux différents tubes.

Tous les tubes thermioniques présentent des éléments communs que nous nous proposons d'étudier ci-dessous :

L'enveloppe ou enceinte extérieure, le culot et les broches de fixation, la cathode émissive, la ou les grilles et enfin l'anode.

Enveloppe ou enceinte extérieure.

Dans la plupart des cas on utilise le verre pour constituer l'enveloppe des tubes thermioniques ; ce matériau se prête particulièrement bien à cet emploi étant donné l'aisance avec lequel on le travaille à chaud (soufflage ou moulage), de plus il constitue un excellent isolant et assure une herméticité absolue ainsi le vide très poussé qui règne à l'intérieur du tube peut se maintenir indéfiniment. Ce vide est obtenu avec la mise en place de toutes les électrodes internes en 2 étapes.

1°) Action d'une pompe à vide.

2°) Action de la combustion explosive d'une parcelle de magnésium appelée " getter " et enflammée après que la pompe soit parvenue à l'extrémité de ses possibilités.

Les fils ou les broches de connexion passent à travers le verre auquel ils sont soudés ; pour éviter des fêlures lors du refroidissement, on utilise des conducteurs dont le coefficient de dilatation est identique à celui du verre. Dans certains cas l'enceinte extérieure est en acier qui présente par rapport au verre l'avantage d'être robuste et de former un blindage électro-statique très utile.

Mais la construction des tubes métalliques est plus compliquée que celle des tubes en verre, et le prix de revient est augmenté. Tous les tubes de réception modernes sont du type " tout verre " et présentent malgré leurs très faibles dimensions des caractéristiques améliorées vis-à-vis des tubes appartenant aux séries précédentes.

Le culot et les broches de fixation.

Le culot d'une lampe est la pièce extérieure à l'enceinte qui maintient les broches de fixation réunies par des conducteurs appropriés aux électrodes internes. Le culot est en matière isolante (bakélite). Il est serti ou cimenté à la base du ballon de verre.

Il existe un grand nombre de types de culots, caractérisés par la disposition des broches dont ils sont pourvus ; en pratique les différents types de culots qui se sont succédés appartenaient toujours à 2 catégories : ceux pour les lampes à caractéristiques américaines et ceux pour les lampes à caractéristiques européennes.

Les tubes de réception modernes sont dépourvus de culot : les broches sortent directement du pied de la lampe constitué par une pastille de verre pressé.

La cathode.

1°) La cathode en Wolfram. (encore appelé Tungstène)

Le Wolfram est un métal particulièrement réfractaire qui peut travailler à une température très élevée correspondant au rouge blanc. En pratique, on peut atteindre 2500° sans que l'évaporation du métal soit intense.

Une température très élevée est nécessaire pour obtenir une émission électronique suffisamment intense ; mais en ce qui concerne le wolfram, la densité de courant émis par cm^2 de cathode définie par la loi de Richardson est relativement faible et la saturation est atteinte assez rapidement.

Les cathodes de wolfram pur universellement employées dans les premières lampes n'équipent maintenant que certaines lampes d'émission de grosse puissance.

2°) La cathode en Wolfram-thorié. (ou tungstène-thorié)

Le thorium est un métal pourvu d'un grand pouvoir émissif électronique mais il est impossible de l'obtenir sous forme de filament. En pratique on utilise le thorium associé au wolfram. Au cours d'une opération appelée activation, le thorium se porte sous forme d'une couche monomoléculaire sur la périphérie du filament de Wolfram de telle sorte que tout se passe alors comme s'il s'agissait d'une cathode en thorium pur.

En raison du pouvoir émissif électronique important, la température peut être abaissée, ce qui prolonge la durée de vie de la cathode (température correspondant au rouge cerise # 1400°).

Les tubes d'émission de moyenne puissance (d'une vingtaine de watts

à quelques centaines de watts) sont du type à chauffage direct et leur filament est en wolfram-thorié.

3°) La cathode à oxydes.

Certains oxydes de métaux dits métaux alcalino-terreux ont un très grand pouvoir émissif électronique (métaux tels que le baryum, le potassium, le strontium) ces oxydes ne sont pas conducteurs du courant et ne peuvent pas par conséquent servir à la constitution d'un filament. Pour profiter de leur exceptionnelle richesse électronique on les utilise sous forme de couche couvrant la périphérie de la cathode ; cette couche est déposée par un procédé analogue à la pulvérisation : elle se révèle à l'oeil nu sous forme d'un revêtement pulvérulent de couleur blanche. Les cathodes à oxydes ainsi constituées peuvent fonctionner à température relativement basse (1100 à 1200°) et présentent une très longue durée de vie : 5000, 10000 heures et plus.

Les cathodes à oxydes présentent une certaine fragilité mécanique, car dans certains cas, des parcelles d'oxydes peuvent se détacher de la cathode ou être détruites par un courant cathodique trop intense.

Les tubes équipés de cathodes à oxydes sont utilisés pour toutes les puissances allant jusqu'à quelques dizaines de watts : ils sont d'un emploi très économique puisqu'ils n'exigent qu'un courant de chauffage relativement faible.

En pratique ils équipent tous les récepteurs, amplificateurs, appareils de mesures de petites puissances et sont, suivant les cas, à chauffage direct ou à chauffage indirect.

Les grilles.

Dans la plupart des tubes la ou les grilles ont une forme hélicoïdale : plus le pas en est serré et plus la distance grille cathode est faible, plus l'action de la grille sur le courant plaque est grande, c'est-à-dire plus la pente est élevée. L'hélice qui constitue la grille est maintenue mécaniquement en place par 2 ou 3 barrettes parallèles à l'axe de la grille et soudées de point en point à cette dernière. Dans la plupart des cas, la grille est en molybdène, ou en alliage de nickel.

Les précautions doivent être prises de façon à éviter que la grille ne soit portée à une température excessive en raison de la proximité de la cathode.

La plaque.

La plaque est dans la plupart des cas cylindrique et maintenue en place par des barrettes de fixation. Dans certains cas elle est striée ou gaufrée de manière à mieux assurer l'évacuation des calories et d'éviter ainsi que sa température ne soit trop élevée. Le corps choisi pour la plaque est généralement le nickel, le fer et quelquefois le tantale ou le graphite.

Etude sommaire de l'amplification par tube triode et des différentes classes d'amplification.

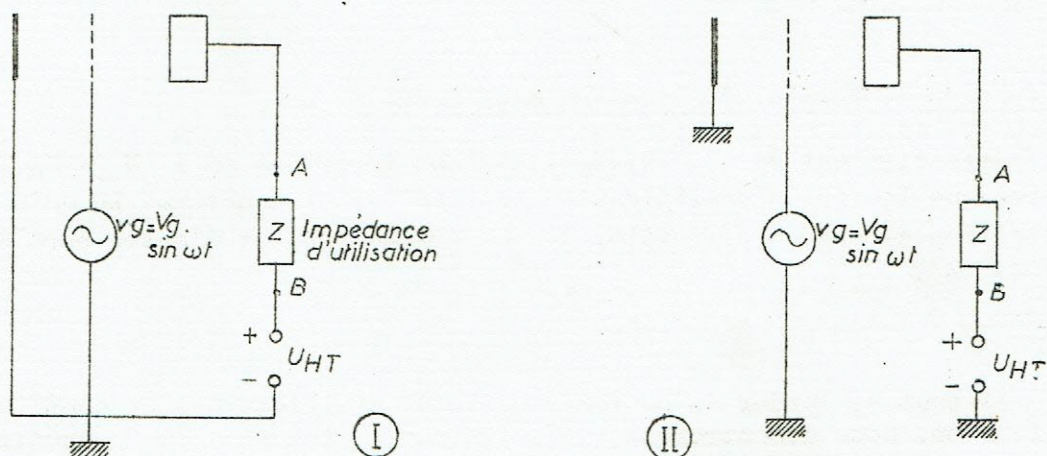
Problème de l'amplification.

Soit une tension alternative sinusoïdale E . Amplifier cette tension, c'est la soumettre à un circuit électrique organisé de telle sorte qu'à la sortie on trouve une tension U , de loi de variation identique à celle de E , mais d'amplitude supérieure. Dans ces conditions, on appelle gain d'amplification le quotient :

$$G = \frac{U}{E}$$

Nous nous proposons de mettre en évidence l'aptitude d'un tube triode à assurer l'amplification.

Schéma de principe d'une triode amplificatrice.



Entre grille et cathode est appliquée la tension alternative supposée sinusoïdale $V_g \sin \omega t$. Elle est appelée tension d'entrée, signal d'entrée, tension incidente, signal incident, ou encore tension alternative de grille ; d'une façon générale c'est la tension qu'il s'agit d'amplifier. Dans le circuit cathode-plaque on distingue d'une part la source de tension continue U_{HT} (une batterie ou un redresseur convenablement filtré) et d'autre part une impédance Z de nature quelconque (ce peut n'être qu'une simple résistance).

Le plus souvent le - HT est réuni à la masse du châssis portant le tube ; pour simplifier on adopte le schéma (II).

Principe de la fonction amplificatrice du tube triode.

1°) Fonctionnement en l'absence de tension alternative V_g .

La grille étant directement réunie à la cathode, le courant continu

de plaque prend une valeur I_{p0} , qui dépend de la tension continue de plaque et qui est donné par la relation de Vallaury.

2°) Fonctionnement en présence de tension alternative V_g .

Les alternances positives de la tension alternative rendent la grille positive ce qui accélère les électrons et augmente le courant de plaque ; au contraire les alternances négatives freinent les électrons, ce qui diminue le courant de plaque. Ainsi, sous l'influence de V_g le courant de plaque oscille sinusoidalement de part et d'autre de I_{p0} (valeur moyenne) et se conduit donc comme un courant continu I_{p0} , superposé à un courant alternatif sinusoidal :

$$i_a = I_a \sin \omega t$$

appelé courant alternatif de plaque.

Ce courant développe aux bornes de Z une d.d.p. sinusoidale :

$$U = Z \cdot I_a$$

appelée tension de sortie ou tension amplifiée.

Effectivement si Z est suffisamment important on a $U > V_g$, de telle sorte que l'effet d'amplification proposé est bien obtenu. Le gain d'amplification dépend en définitif, d'une part du tube et d'autre part de la grandeur de Z .

Remarque.

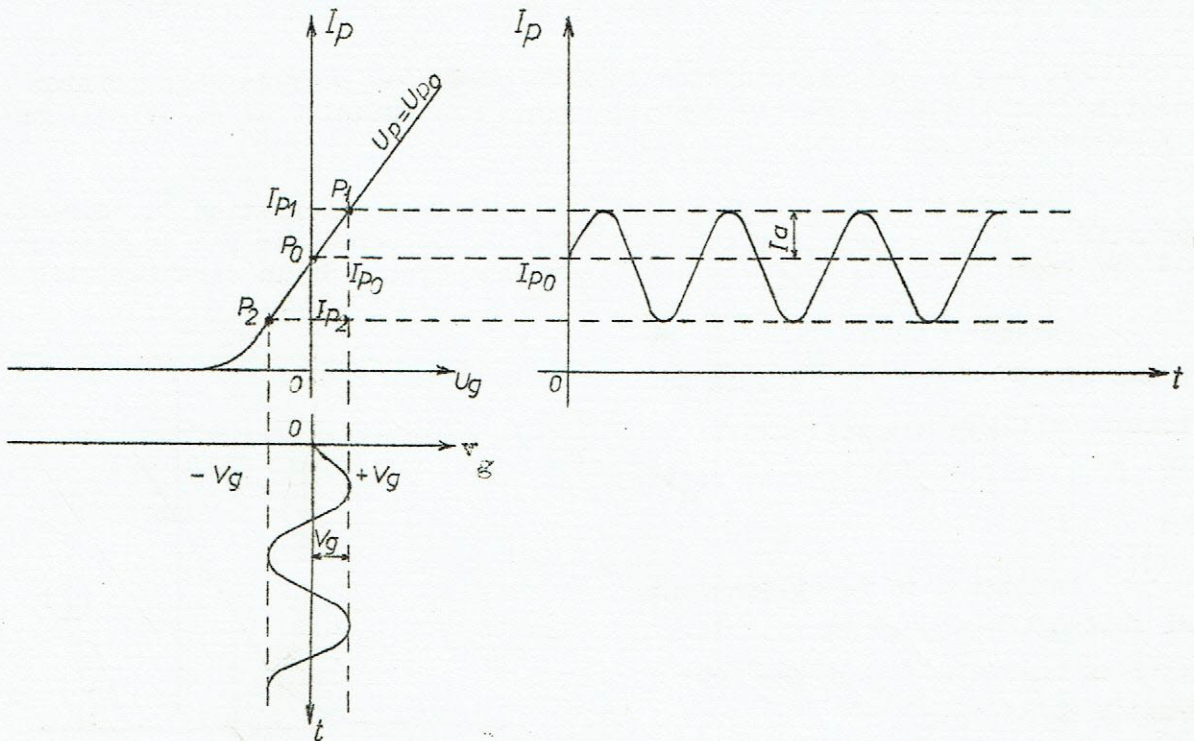
Il faut se garder de confondre gain d'amplification, et coefficient d'amplification. Nous démontrerons que la valeur maxima de "G" théorique est "K" mais qu'en pratique G est toujours inférieur à K.

Interprétation graphique du fonctionnement de la lampe.

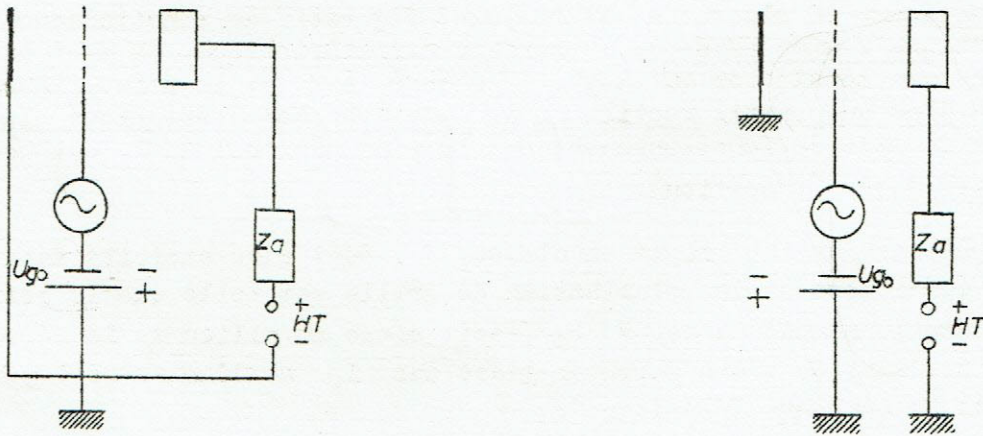
Représentons la courbe $I_p U_g$ valable pour la tension continue de plaque U_{p0} . En l'absence de tension alternative V_g sur la grille et celle-ci étant à 0 V vis-à-vis de la cathode, le fonctionnement est caractérisé par le point P_0 auquel correspond l'intensité de plaque I_{p0} .

Représentons maintenant la tension alternative de grille V_g sur un système de 2 axes rectangulaires " $V_g - t$ ", de telle sorte que l'axe des " t " soit dans le prolongement de l'axe des I_p . On voit ainsi en présence de V_g le point P se déplacer sur la caractéristique de part et d'autre de P_0 , entre P_1 et P_2 ; on en déduit que le courant de plaque oscille de part et d'autre de I_{p0} , entre I_{p1} et I_{p2} . Sur un troisième système d'axes " $I_p - t$ ", tel que l'axe des t passe par l'axe des U_g , on met en évidence les variations du courant de plaque. On vérifie ainsi que le courant

de plaque en fonctionnement résulte d'un courant continu I_{p0} et d'un courant alternatif d'amplitude I_a .



Nécessité d'une polarisation négative de la grille.



Le fonctionnement précédemment étudié est tel que la grille devient positive une fois par période, pendant la durée d'une alternance ; il en résulte pour le tube un fonctionnement défectueux car la grille capte alors les électrons au détriment de la plaque, ce qui forme un courant de grille indésirable.

Afin d'éviter ce phénomène on porte la grille à une tension convenable U_{g0} , négative vis-à-vis de la cathode et de valeur telle que la grille ne puisse jamais devenir positive en fonctionnement.

La tension U_{g0} est appelée polarisation négative de grille, ou plus simplement " polarisation " .

Différents régimes ou classes de fonctionnement d'un tube amplificateur.

Il semble que la condition imposée ci-dessus pour la polarisation ne soit pas critique ; effectivement il existe une infinité de polarisations qui y satisfont.

Toutefois il importe pour qu'il n'y ait pas déformation du courant alternatif de plaque, que le point figuratif P ne parvienne pas en dessous de A de façon à ne pas pénétrer dans la région courbe de la caractéristique.

Puisque d'autre part P ne doit pas aller au-delà de B, la polarisation optimum est l'abscisse du point P_0 , milieu de la partie rectiligne A - B.

Le régime de fonctionnement ainsi obtenu est appelé régime A. Mais il en existe d'autres que nous nous proposons de définir.

Régime A ou classe A.

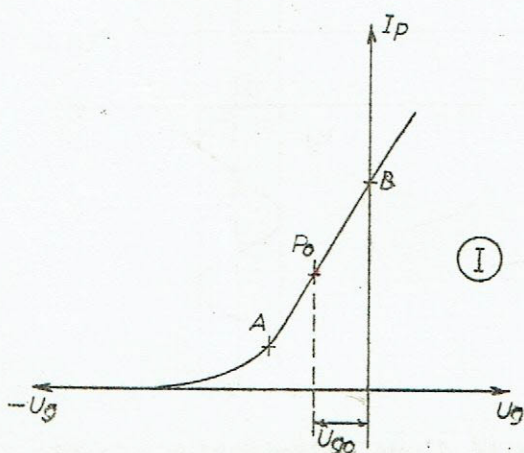
D'une façon générale on dit qu'un tube fonctionne en classe A si le point figuratif de fonctionnement se déplace dans une région plane de la surface caractéristique. On peut dans une certaine mesure considérer qu'il y a " classe A " si le point figuratif se déplace dans une partie rectiligne de la courbe caractéristique I_p , U_g exploitée. Ce mode de fonctionnement est le plus habituel en ce qui concerne les petits tubes (réception).

En pratique un tube réglé en classe A, peut être exploité dans les meilleures conditions si la polarisation de grille est telle que le point figuratif de fonctionnement au repos P_0 , soit situé au milieu de la région rectiligne AB, limitée d'une part par l'axe des I_p et d'autre part par la naissance de la courbure inférieure.

Propriétés d'un tube en classe A.

a) Au repos le courant continu livré par la source présente une certaine valeur I_{p0} (obtenue par l'équation de Vallaury). La source H.T. livre donc au repos une certaine puissance $U_{HT} I_{p0}$.

b) En fonctionnement le courant continu livré par la source conserve



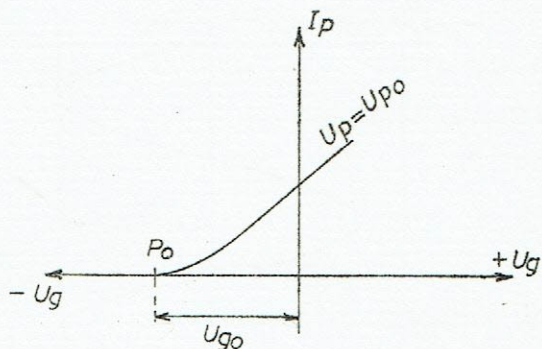
la valeur I_{p0} caractérisant le repos. La puissance livrée par la source H.T est indépendante de l'excitation grille (tension incidente).

c) Le rendement $\left(\frac{\text{Puissance dans } Z}{\text{Puissance fournie par H.T}} \right)$ est faible et ne peut dépasser 25% pour une triode ; ce qui est un inconvénient lorsque les puissances mises en jeu sont importantes (cas de l'amplification de puissance).

d) Le courant alternatif de plaque est à l'image fidèle de la tension alternative de grille : il n'y a pas de déformation (en pratique peu de distorsion) ; propriété très appréciée.

Régime B ou classe B .

Un tube fonctionne en classe B lorsque le point figuratif P_0 est au pied de la caractéristique $I_p - U_g$ correspondant à la tension de plaque utilisée.



Le fonctionnement en classe B est exploité dans des cas particuliers, notamment lorsque les puissances mises en jeu sont importantes comme c'est le cas lorsqu'il s'agit de tubes d'émission. Etant donné la polarisation utilisée, les conditions de fonctionnement sont différentes des conditions en classe A ; en particulier seules les alternances positives de la tension alternative de grille donnent naissance au courant de plaque, de telle sorte que celui-ci ne reproduit pas fidèlement la tension alternative de grille : c'est un courant unilatéral pulsé.

Propriétés d'un tube en classe B .

a) Au repos le courant continu livré par la source est nul, donc la puissance fournie par cette source est également nulle.

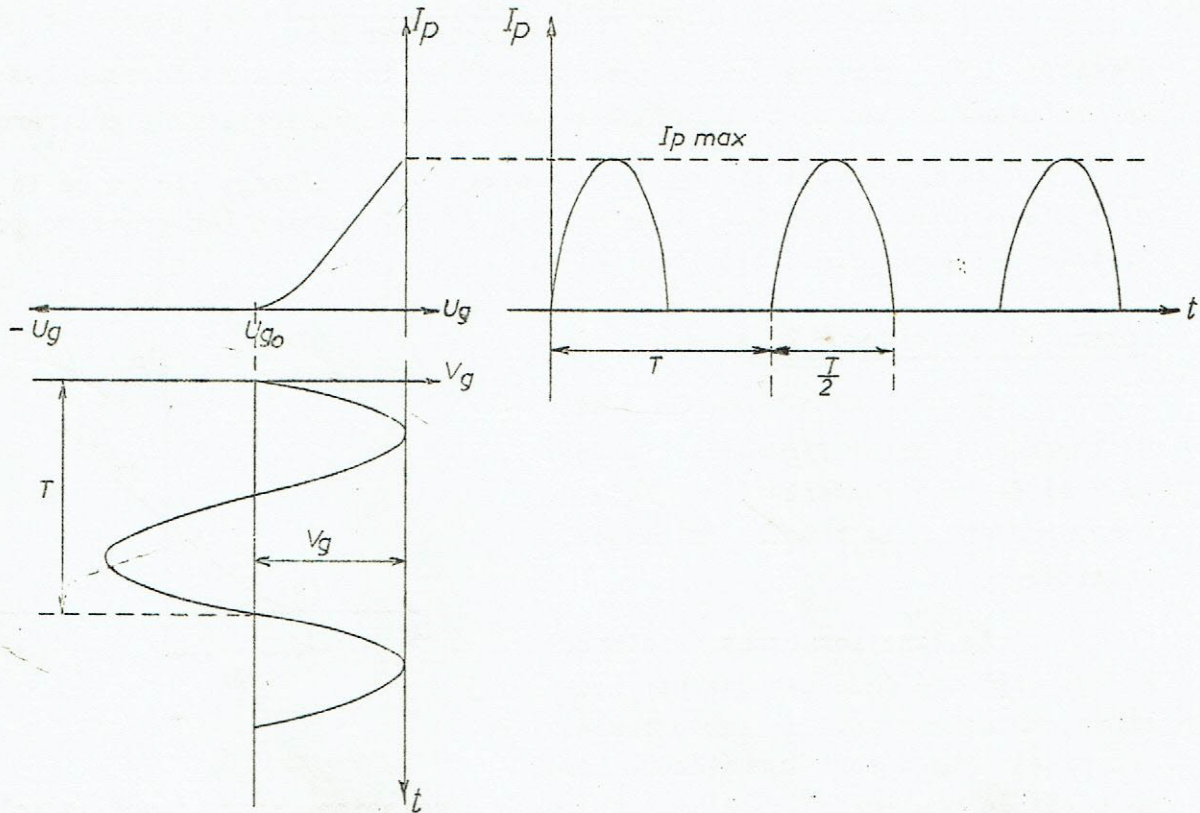
b) En fonctionnement la source HT livre un certain courant continu I_{p_m} proportionnel à l'amplitude de la tension incidente V_g et de valeur :

$$I_{p_m} = \frac{I_p \text{ max}}{\kappa}$$

La puissance livrée par la source H.T. :

$$P_{HT} = U_{HT} \times I_{p_m}$$

est proportionnelle à V_g (alors qu'en classe A elle est indépendante de V_g).



c) Le rendement est plus important qu'en classe A, il peut atteindre en pratique 60% (c'est la raison qui fait choisir la classe B dans le cas des amplificateurs de grosses puissances : leur fonctionnement est plus économique que dans celui des amplificateurs classe A).

d) Le courant alternatif de plaque n'est pas à l'image de la tension alternative de grille : il y a une distorsion très importante.

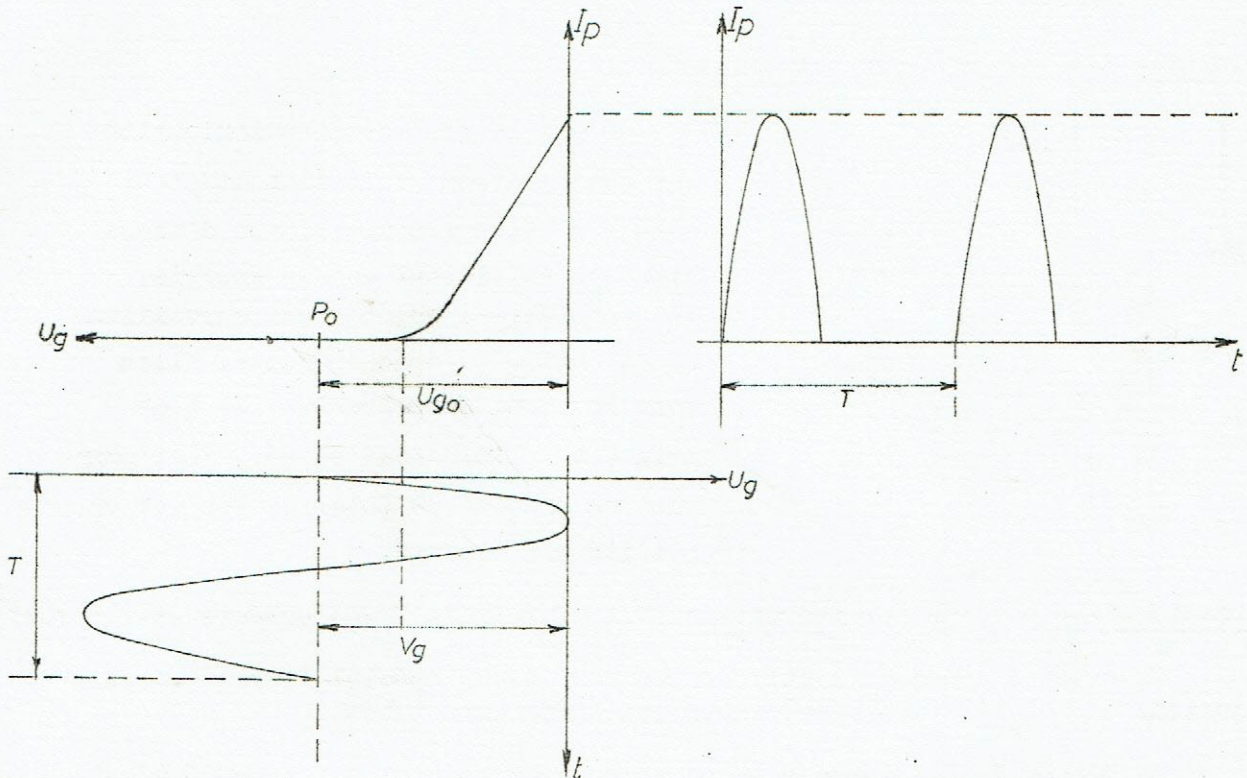
On démontre que cette distorsion correspond à la présence de composantes sinusoïdales appelées harmoniques, qui viennent se superposer à la composante fondamentale qui est à l'image de la tension alternative de grille ; il s'agit d'harmoniques paires, d'amplitude d'autant plus faible que leur rang est plus élevé.

Le réglage en classe B d'un amplificateur peut n'entraîner aucune distorsion s'il parvient à supprimer toutes les harmoniques en question (voir chapitres sur l'amplification de puissance).

Régime C, ou classe C.

Un tube est réglé en classe C si sa polarisation de grille U_{g0} est telle que son point figuratif de fonctionnement au repos P_0 , est situé au-delà du point correspondant à la classe B.

Comme le fonctionnement en classe B, celui de la classe C est exploité dans des cas particuliers, notamment dans celui des tubes d'émission. Etant donnée la polarisation de grille très négative, la distorsion est considérable mais le rendement peut être important.



Propriétés d'un tube fonctionnant en régime C.

a) Au repos le courant livré par la source de H.T. est nul ; la puissance fournie par cette source est nulle.

b) En fonctionnement la source H.T. livre un courant continu I_{pm} d'autant plus grand que la tension d'entrée V_g est plus importante. La puissance livrée par la source H.T. croît donc avec l'excitation. Le rendement est encore plus important qu'en classe B et peut dépasser 70% d'où l'utilisation de la classe C, dans les étages amplificateurs à grande puissance des émetteurs.

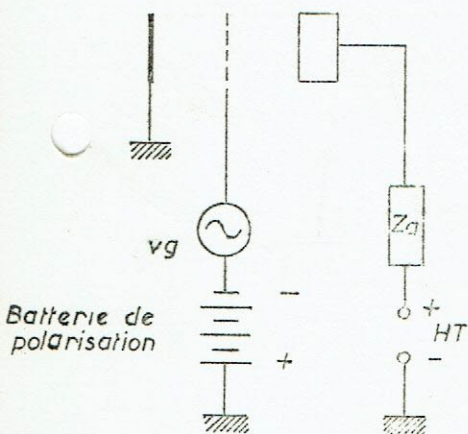
Le courant alternatif de plaque est encore plus distordu que dans le cas de la classe B.

De très nombreuses harmoniques viennent se superposer à la fondamentale ; d'une façon générale la classe C est surtout mise à profit dans les étages amplificateurs haute fréquence des émetteurs. Elle ne convient pas à l'amplification des signaux de basse fréquence à cause de la distorsion qui est irréductible.

Différents procédés de polarisation de la grille.

Définir le point figuratif de fonctionnement au repos et lui donner pour une classe déterminée, l'emplacement optimum, tel est l'objet de la polarisation négative de grille.

Polarisation fixe obtenue par batterie.

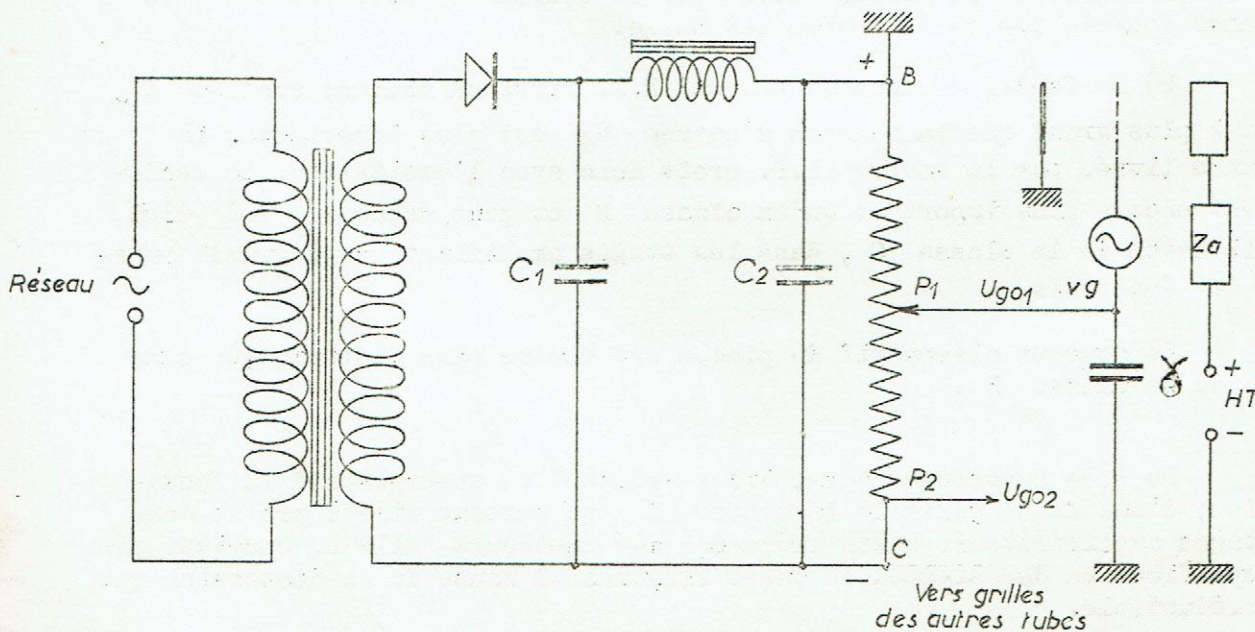


C'est le procédé de polarisation qui est apparemment le plus simple ; mais les batteries de pile ou d'accus, bien que ne livrant aucune énergie, doivent faire l'objet d'une surveillance attentive donc onéreuse. Elles sont lourdes, encombrantes, et leur prix est relativement élevé. C'est pourquoi ce procédé de polarisation est en réalité peu employé.

Polarisation fixe obtenue par redresseur. (Voir fascicule " Redresseurs et filtres")

Ce procédé consiste à utiliser un redresseur spécial livrant la ou les tensions de polarisation nécessaires aux différents tubes.

En raison de la présence de ce redresseur spécial, ce procédé n'est généralement utilisé que dans les amplificateurs et les émetteurs d'assez grosse puissance.



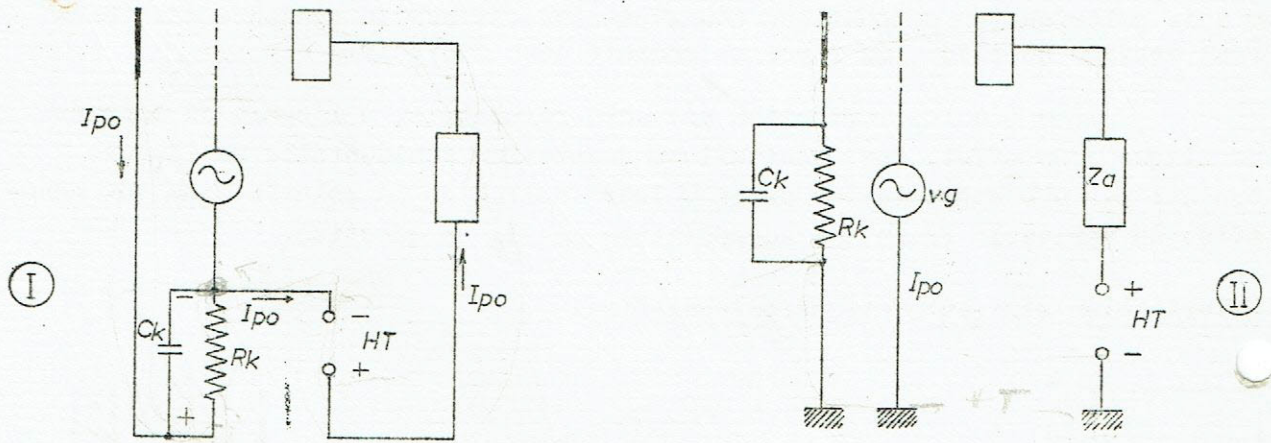
Ce montage de redresseur est du type simple ou double alternance équipé d'un filtre très efficace.

On le voit, grâce au branchement de la masse au point B, on obtient bien en C, une tension négative vis-à-vis de la masse. Des prises telles que P₁ et P₂ permettent d'obtenir différentes valeurs de tensions intermédiaires pour assurer la polarisation des différents tubes.

Remarque :

γ est un condensateur dit de " découplage " et dont l'objet est de fermer directement le circuit entre base du générateur et la cathode ; sa réactance $\frac{1}{\gamma \omega}$ doit être la plus faible possible.

Polarisation automatique (ou autopolarisation).



C'est le procédé le plus employé dans le cas du réglage en classe A. Il est en effet très simple. La polarisation est obtenue à l'aide d'une résistance R_K située entre cathode et - HT. La figure (I) montre que le courant de plaque détermine aux bornes de R_K une chute de tension vis-à-vis de la cathode. U_{g_0} étant la valeur de la polarisation nécessaire au tube il suffit de donner à R_K une valeur telle que l'on ait :

$$U_{g_0} = - R_K I_{p_0}$$

I_{p_0} est le courant de la plaque pour la polarisation considérée. Le condensateur C_K joue un rôle très important au point de vue de l'amplification.

En l'absence de C_K , le courant alternatif de plaque circule dans la résistance R_K et fait varier la polarisation au rythme de la tension V_g à amplifier. Il importe que cette polarisation soit rigoureusement stable. En donnant à C_K une valeur suffisamment importante, ce condensateur se conduit en véritable court-circuit de R_K , en ce qui concerne le courant alternatif de plaque ; l'expérience montre que sa présence est efficace s'il présente

une capacité telle que l'on ait , à la plus basse fréquence à amplifier :

$$\frac{1}{C_K \omega} \ll \frac{R_K}{10}$$

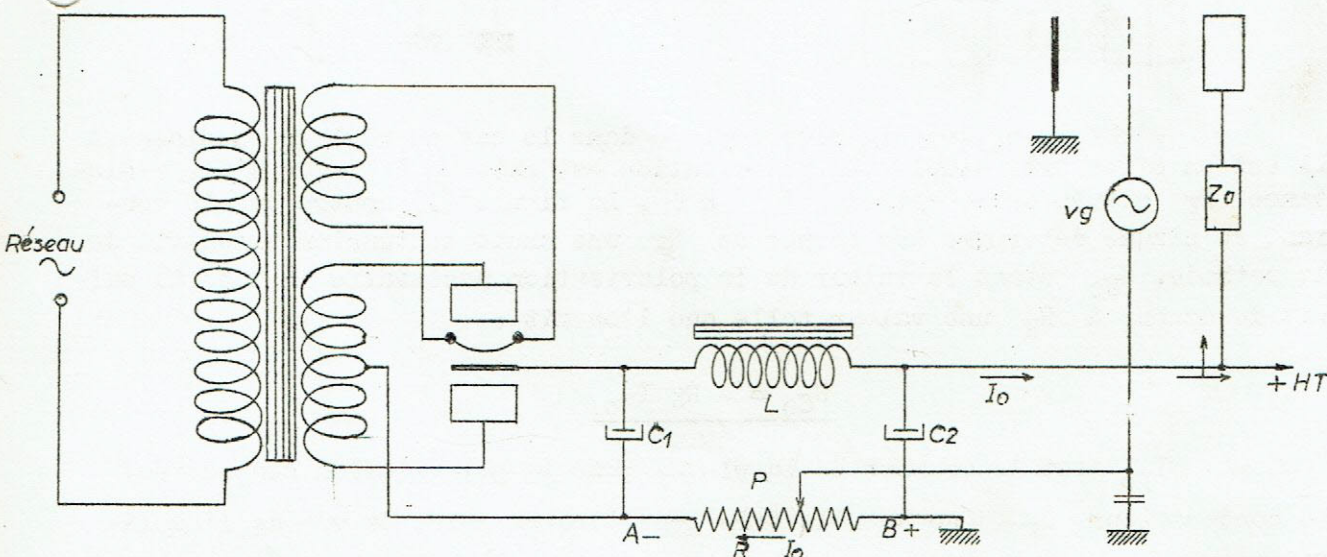
Cette condition conduit dans le cas des fréquences acoustiques à des capacités de plusieurs microfarads, d'où l'emploi de condensateurs électro-chimiques.

Remarques importantes :

I - L'autopolarisation ne peut servir à elle seule pour assurer le fonctionnement d'un tube en classe B ou en classe C. En effet, par définition, il n'y a aucun courant de plaque au repos en classe B ou en classe C ; la polarisation automatique basée précisément sur la présence d'un courant continu de plaque au repos ne saurait donc convenir.

II - L'autopolarisation est auto-régulatrice à l'égard du courant de plaque ; en effet, une éventuelle augmentation accidentelle de I_p se traduit par une augmentation de la valeur absolue de la polarisation qui constitue un véritable frein à l'augmentation de I_p en question.

Polarisation semi-automatique ou semi-fixe.



La polarisation semi-fixe est obtenue en utilisant comme source de tension continue de polarisation l'alimentation même du récepteur ou de l'amplificateur considéré. Dans ces conditions, la polarisation d'un tube est fonction partielle de son propre courant de plaque, d'où les qualificatifs " semi-fixe " ou "semi-automatique " .

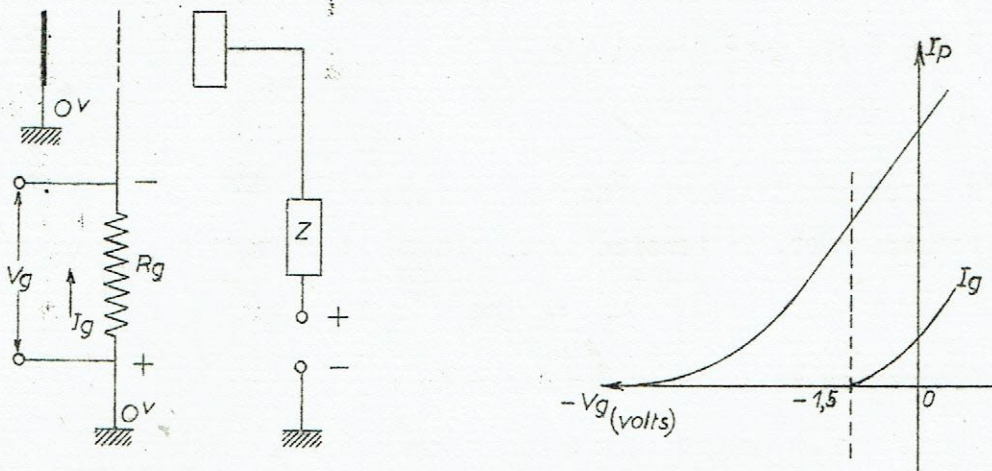
Pour obtenir la tension de polarisation, on réunit la borne " moins " haute tension à la masse, à travers une résistance R parcourue par le courant total continu I_0 livré par le redresseur ; I_0 développe aux bornes de

R une d.d.p. , R I₀ rendant A négatif vis-à-vis de la masse. Une prise P convenablement établie sur R permet d'obtenir la polarisation convenable pour le tube considéré.

Polarisation automatique par courant de grille.

On réunit la grille à la cathode par l'intermédiaire d'une résistance R_g de forte valeur (2 à 10 mégohms pour les tubes amplificateurs ; 20 à 50 kΩ pour les tubes oscillateurs).

Au repos, la grille et la cathode étant reliées à la masse, il n'y a aucune différence de potentiel entre ces deux électrodes et, comme le montrent les courbes caractéristiques, il se produit un léger courant grille (quelques centaines de microampères).



Ce courant grille provoque aux bornes de R_g , une chute de tension rendant la grille plus négative que la cathode. Cette chute de tension ne peut, en aucun cas dépasser - 1,5 volt, puisqu'au delà de cette valeur de U_g , il n'y a plus de courant grille (sauf si un signal V_g de grande amplitude est appliqué à la grille).

Ce dispositif est surtout utilisé dans le cas des tubes oscillateurs et avec les tubes amplificateurs dont la tension d'attaque v_g a une très faible amplitude.

Etude de la fonction amplificatrice du tube triode en classe A .

Nous nous proposons de déterminer graphiquement et mathématiquement les conditions de fonctionnement d'une triode amplificatrice réglée en classe A , et de mettre en évidence son aptitude à assurer une amplification.

Fonctionnement de la triode en présence d'un signal incident sinusoidal.

Règlage en classe A . Charge résistante.

I - Etude mathématique.

a) Fonctionnement en l'absence de signal incident.

Nous considérons que le tube est utilisé dans une région plane de surface caractéristique et nous nous proposons de déterminer l'intensité I_p du courant de plaque.

D'une façon générale on a :

$$\rho I_p = K u_g + u_p - U_0$$

Puisque $v_g = 0$ on a $u_g = U_{g0}$.

D'autre part, la tension entre plaque et cathode a pour expression

$$u_p = U_{HT} - R_a I_p$$

L'équation de Vallaury devient donc :

$$\rho I_p = K U_{g0} + U_{HT} - R_a I_p - U_0$$

Soit : $I_p (\rho + R_a) = K U_{g0} + U_{HT} - U_0$

$$I_p = \frac{K U_{g0} + U_{HT} - U_0}{\rho + R_a} = I_{p0}$$

Cette expression est celle du courant continu de plaque en l'absence du signal incident.

b) Fonctionnement en présence d'un signal incident sinusoidal.

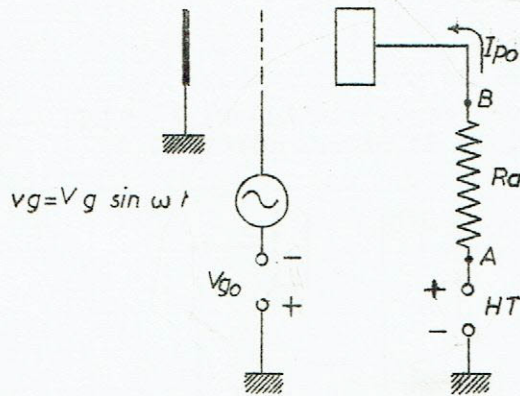
Remplaçons à nouveau dans l'équation générale de la triode U_g et U_p par leurs valeurs dans le cas particulier considéré. On a évidemment maintenant :

$$u_g = U_{g0} + V_g \sin \omega t$$

$$u_p = U_{HT} - R_a I_p$$

L'équation de la triode s'écrit donc :

$$\rho I_p = K (U_{g0} + V_g \sin \omega t) + U_{HT} - R_a I_p - U_0$$



Soit : $I_p (\rho + R_a) = K U_{g0} + U_{HT} - U_0 + K V_g \sin \omega t$

d'où : $I_p = \frac{K U_{g0} + U_{HT} - U_0}{\rho + R_a} + \frac{K V_g}{\rho + R_a} \sin \omega t$

On remarque :

1°) que $\frac{K U_{g0} + U_{HT} - U_0}{\rho + R_a}$ est l'intensité du courant de plaque qui existait en l'absence du signal incident. I_{p0}

2°) que $\frac{K V_g}{\rho + R_a} \sin \omega t$ est la valeur instantanée d'un courant sinusoïdal superposé au courant équivalent, de même fréquence que la tension incidente, en concordance de phase avec cette dernière et d'amplitude :

$$I_a = \frac{K V_g}{\rho + R_a}$$

I_a

En définitive, la valeur instantanée du courant de plaque est :

$$I_p = I_{p0} + I_a \sin \omega t$$

I_{p0} est appelé composante continue du courant de plaque et

I_a composante alternative du courant de plaque .

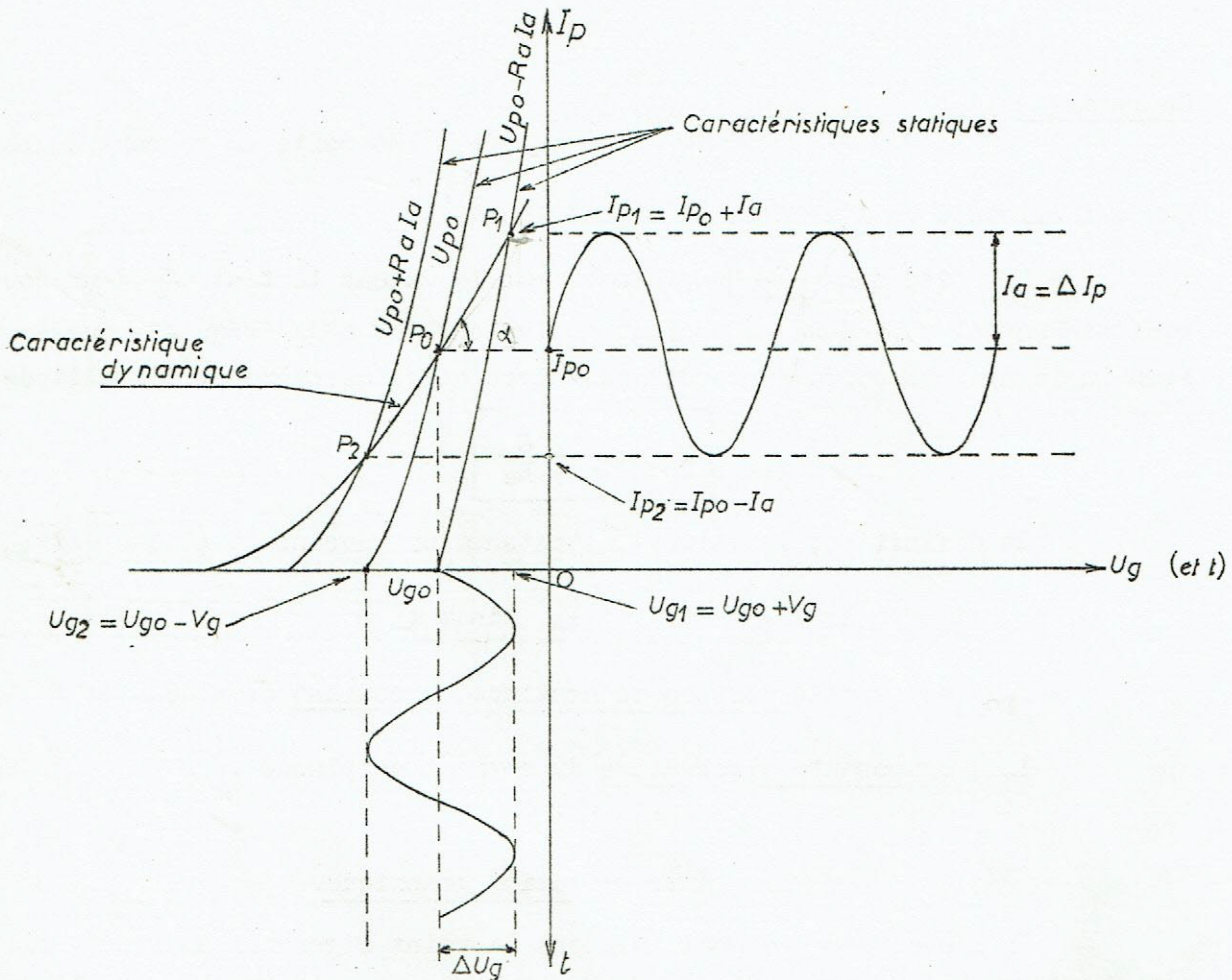
II - Interprétation graphique.

En l'absence du signal incident le point figuratif au repos P_0 est placé sur la caractéristique $I_p U_g$ valable pour la tension de plaque $U_{p0} = U_{HT} - R_a I_{p0}$.

Sous l'action du signal incident la tension de grille oscille de part et d'autre de U_{g0} entre U_{g1} et U_{g2} , ceci entraîne des variations de I_p entre I_{p1} et I_{p2} . Lorsque I_p augmente et approche de I_{p1} la tension de plaque diminue et le point figuratif P quitte P_0 pour passer sur des caractéristiques correspondant à des tensions de plaque de plus en plus faibles. En particulier lorsque I_p atteint le maximum I_{p1} , le point figuratif P atteint la caractéristique correspondant à la tension de plaque la plus faible $U_{p1} = U_{p0} - R_a I_a$ (Position P_1) .

Inversement lorsque la tension de grille diminue vers U_{g2} , I_p diminue et U_p augmente jusqu'à $U_{p2} = U_{p0} + R_a I_a$ (position P_2) .

En définitif le point figuratif P décrit une courbe P_1, P_0, P_2 , appelée courbe caractéristique dynamique $I_p U_g$ (par opposition aux autres courbes appelées courbes statiques).



Remarques :

a) Premier cas limite $R_a = 0$

Les variations de courant plaque n'entraînent aucune variation de tension plaque : la caractéristique dynamique se confond donc avec la statique valable pour U_{p0} . Il n'y a aucune amplification.

b) Deuxième cas limite $R_a = \infty$

La caractéristique dynamique est horizontale.

Puissance livrée par la source H.T. en fonctionnement.

Elle a pour expression $P_0 = U_{HT} \times I_{p0}$. Puisque I_{p0} est indépendant de V_g , la puissance livrée en est, elle aussi, indépendante.

Pente dynamique.

C'est le coefficient angulaire de la caractéristique dynamique en sa partie rectiligne aux environs de P_0 .

$$S_d = \frac{\Delta I_p}{\Delta U_g} = \operatorname{tg} \alpha$$

Mais :
$$\Delta I_p = I_a = \frac{K V_g}{\rho + R_a}$$

et
$$\Delta U_g = V_g$$

d'où

$$S_d = \operatorname{tg} \alpha = \frac{K}{\rho + R_a}$$

Droite de charge.

Sur le réseau $I_p - U_p$, on place tout d'abord le point de repos P_0 défini plus haut. On cherche à déterminer comment se déplace ce point P_0 lorsque le tube va fonctionner : c'est-à-dire lorsqu'on va appliquer entre grille et cathode, une tension alternative v_g ; pour cela il faut trouver comment varie le courant plaque I_p lorsque le tube est chargé par une résistance R_a .

La deuxième loi de Kirchoff appliquée au circuit plaque donne :

$$\sum E = \sum R I$$

$$U_{HT} = R_a I_p + U_p$$

$$R_a I_p = U_{HT} - U_p$$

$$I_p = - \frac{U_p}{R_a} + \frac{U_{HT}}{R_a}$$

$$I_p = - \frac{1}{R_a} U_p + \frac{U_{HT}}{R_a}$$

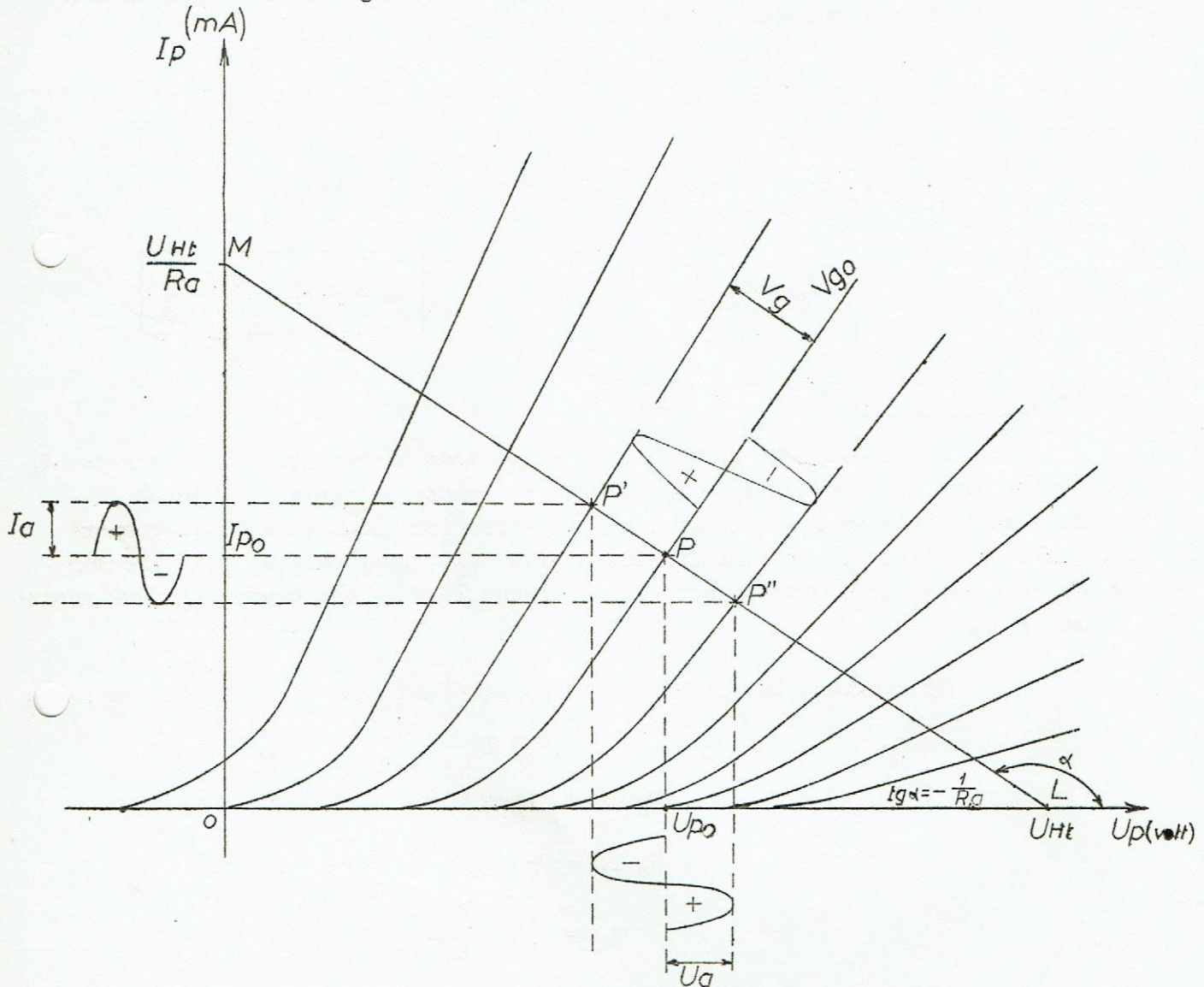
Cette fonction sera représentée par une droite dont l'ordonnée a l'origine $b = \frac{U_{HT}}{R_a}$ et le coefficient angulaire $a = - \frac{1}{R_a}$.

On peut donc tracer cette droite qui passe par le point de repos et qui coupe les axes aux points :

$$L (I_p = 0 ; U_p = U_{HT}) \text{ et } M (U_p = 0 ; I_p = \frac{U_{HT}}{R_a})$$

On remarquera que le coefficient angulaire ayant pour valeur $-\frac{1}{R_a}$

l'inclinaison de la droite dépend uniquement de R_a . Cette droite est appelée " droite de charge " .



Observation du fonctionnement d'un tube amplificateur sur la droite de charge.

A l'aide du réseau $I_p U_p$ et de la droite de charge on peut effectuer un certain nombre d'observations qui facilitent la compréhension du fonctionnement d'un tube triode amplificateur.

I - Si on applique entre grille et cathode une tension alternative d'amplitude V_g , le point de repos P_0 se déplacera jusqu'en P' et P'' . On retrouve ici les points extrêmes de fonctionnement P' et P'' qui s'écartent d'autant plus de P_0 que l'amplitude de v_g est grande.

II - En projetant P' et P'' sur l'axe des ordonnées on peut repérer la variation subie par le courant plaque. On notera que ce courant plaque est décomposable en une somme de deux courants ;

- a) un courant continu I_{p0} .
- b) un courant alternatif d'amplitude I_a . La composante alternative I_a est en phase avec la tension alternative V_g .

III - En projetant P' et P'' sur l'axe des abscisses on détermine la variation de la tension plaque décomposable en deux tensions :

- a) une composante continue de valeur U_{p0} .
- b) une composante alternative d'amplitude U_a .

Le graphique montre que la composante alternative est en opposition de phase avec la tension V_g et le courant I_a .

IV - Il est possible de déterminer graphiquement le gain en tension à l'aide de la droite de charge, puisqu'on sait que par définition :

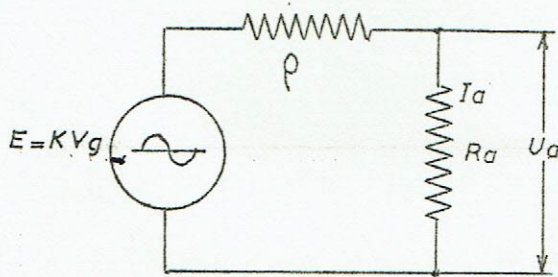
$$G = \frac{U_a}{V_g}$$

Ne pas confondre K et G ; en effet, le coefficient d'amplification se calcule graphiquement avec I_p constant : $K = \frac{\Delta U_p}{\Delta U_g}$, tandis que dans un tube fonctionnant en amplificateur, le courant I_p est variable, par suite de la présence de la résistance R_a .

V - A partir de la droite de charge on peut déterminer graphiquement la pente dynamique du tube, c'est-à-dire la pente, compte tenu de la présence d'une résistance de charge R_a dans le circuit plaque :

$$S_d = \frac{I_a}{V_g}$$

Schéma équivalent du circuit de plaque d'un tube triode (classe A).



L'expression de l'intensité du courant alternatif de plaque $I_a = \frac{K V_g}{\rho + R_a}$ montre qu'au point de vue du courant alternatif en question, le circuit plaque de la lampe peut être considéré comme celui d'un alternateur de f.é.m. $E = K V_g$ et de résistance interne ρ débitant dans la résistance de charge R_a .

Tension alternative de sortie ou tension amplifiée.

I_a développe aux bornes de R_a une d.d.p. alternative appelée tension de sortie ou tension amplifiée :

$$U_a = R_a I_a$$

$$U_a = V_g \cdot \frac{K R_a}{\rho + R_a}$$

Gain en tension.

Au cas où U_a est supérieur à V_g le quotient $G = \frac{U_a}{V_g}$ est appelé gain en tension du tube considéré. En divisant les 2 membres de l'expression de U_a par V_g on trouve :

$$\frac{U_a}{V_g} = G = \frac{K R_a}{R_a + \rho}$$

Conditions à satisfaire pour avoir $G > 1$.

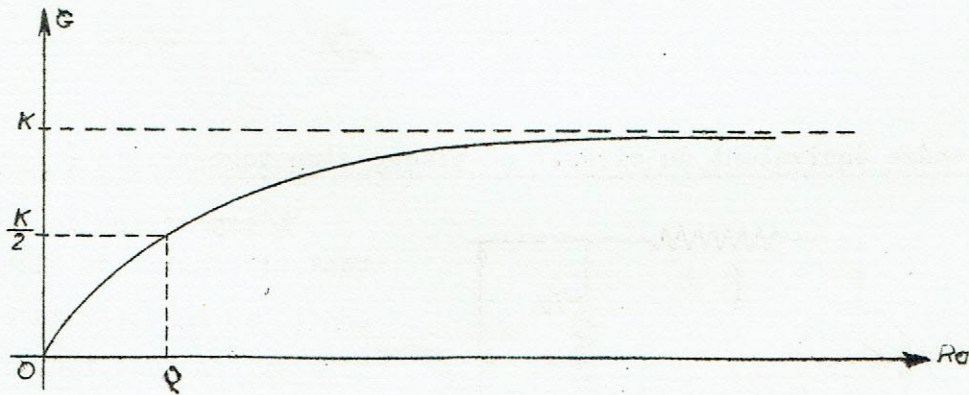
$$\text{Il faut } K R_a > R_a + \rho ; R_a (K - 1) > \rho \text{ d'où } R_a > \frac{\rho}{K - 1}$$

Dès que cette condition est satisfaite le tube considéré amplifie.

Fonction $G = f(R_a)$.

On a : $G = \frac{K R_a}{R_a + \rho} = f(R_a)$ fonction physiquement définie seulement pour $R_a \geq 0$. Pour $R_a = 0$ on a $G = 0$. Pour $R_a = \infty$ on a $G = K$ d'où :

R_a	0	$+\infty$
G	0	K



Autre expression du gain.

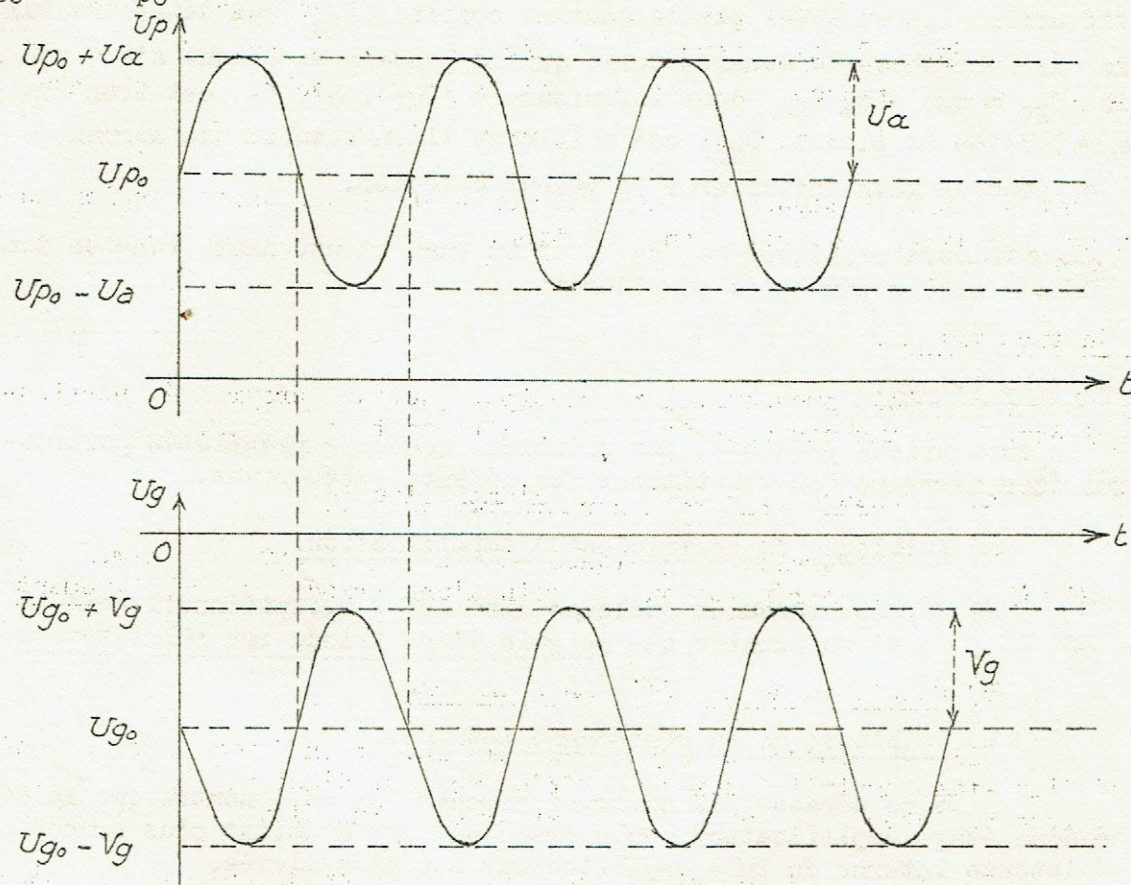
Puisque $S_d = \frac{K}{\rho + R_a}$ On peut écrire :

$$G = S_d R_a$$

Représentation graphique combinée de $U_g = f_1(t)$ et $U_p = f_2(t)$.

Cette représentation fait apparaître comment varient U_p et U_g

en fonction du temps. Elle montre que U_p et U_g varient en opposition de phase. En effet, lorsque U_g augmente, par exemple I_p augmente aussi donc la chute de tension aux bornes de R_a ($R_a I_p$) croît, par conséquent la tension instantanée de plaque $u_p = U_{HT} - R_a i_p$ diminue. On voit d'autre part que U_g et U_p oscillent de part et d'autre des valeurs moyennes respectives U_{g0} et U_{p0} .



Courbes représentant graphiquement les variations de tensions instantanées :

$$u_g = U_{g0} + V_g \sin \omega t \quad \text{et} \quad U_p = U_{p0} - R_a I_a$$

soit :

$$u_p = U_{p0} - R_a I_a \sin \omega t = U_{p0} - U_\alpha \sin \omega t$$

Tension alternative de plaque. Opposition de phase vis-à-vis de V_g .

On appelle tension alternative de plaque la composante alternative de la tension périodique de plaque U_p .

C'est donc : $- U_\alpha \sin \omega t$; elle est représentée par la sinusoïde supérieure de la figure précédente et se trouve en opposition de phase avec la tension alternative de grille v_g . Elle est évidemment égale à l'amplitude

Défaut du tube triode

et opposée en phase à la tension alternative aux bornes de R_a .

Note concernant la chute de tension aux bornes de R_a .

En fonctionnement, la résistance R_a est traversée par le courant alternatif utile I_a et aussi par le courant continu I_{p0} qui détermine aux bornes de R_a une chute de tension telle que la tension de plaque n'est pas U_{HT} mais $U_{p0} = U_{HT} - R_a I_{p0}$ donc inférieure à U_{HT} . Si R_a est trop importante, la tension de plaque U_{p0} est faible et il en résulte une augmentation de ρ donc un gain inférieur à la valeur calculée.

Les valeurs pratiques de R_a pour un tube et une haute tension donnés sont donc limitées par cette considération.

Défauts du tube triode.

Le tube triode présente, par principe, quelques propriétés particulières qui dans certains cas constituent des défauts très graves.

a) Faiblesse du coefficient d'amplification.

Il dépasse rarement quelques dizaines ; exceptionnellement il atteint 70 à 90 ; il en résulte que le gain d'une triode est relativement faible.

b) Faiblesse de la résistance interne.

Elle ne dépasse pas quelques kilohms. Or on démontre que la sélectivité d'un étage amplificateur haute fréquence est d'autant plus grande que la résistance interne du tube amplificateur est plus élevée.

Le tube triode convient donc mal en raison de sa faible résistance interne pour l'amplification en haute fréquence.

c) Valeur excessive de la capacité interne de grille-plaque.

La capacité naturelle entre la grille et l'anode d'une triode appelée encore capacité interne parasite grille anode est de l'ordre de quelques picofarads.

Cette valeur apparemment faible est cependant telle que la dite capacité entraîne de très graves perturbations dans le fonctionnement de l'amplificateur ; il en résulte en particulier, les 2 conséquences suivantes :

(*) - On démontre qu'en fonctionnement l'espace grille-cathode présente une capacité virtuelle ou capacité dynamique d'entrée du tube venant shunter la source de tension V_g et ayant pour valeur :

$$C_e = C_{gk} + C_{ga} (1 + G)$$

C_{gk} : capacité interne grille-cathode.

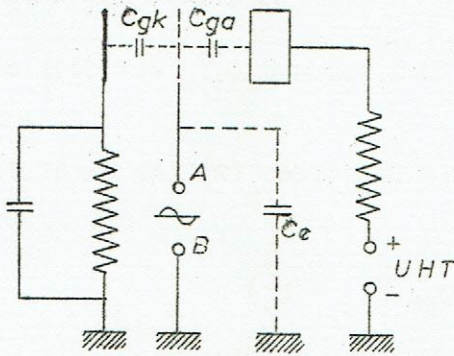
C_{ga} : capacité interne grille-anode.

G : gain en tension du tube .

C_e : capacité d'entrée. Elle atteint parfois de telles valeurs qu'avec des fréquences élevées il peut en résulter un véritable court-circuit du générateur de tension V_g .

Exemple:

Soit un tube triode dont $C_{gk} = C_{ga} = 3 \text{ pF}$ et amplifiant 30 fo



Tout se passe comme s'il y avait entre A et B une capacité $C_e =$ à $C_e = 3 + 3(1 + 30) = 96$ picofarads.

Ce phénomène est appelé effet Miller .

(b) - Lorsqu'il y a un circuit oscillant dans la connexion de grille et un circuit oscillant dans la connexion de plaque accordés tous deux sur la même fréquence, la capacité grille plaque peut, si elle est trop importante, empêcher le tube d'amplifier en le transformant en générateur d'oscillations électriques, par suite du retour de l'énergie de sortie vers l'entrée, à travers la capacité grille - plaque.

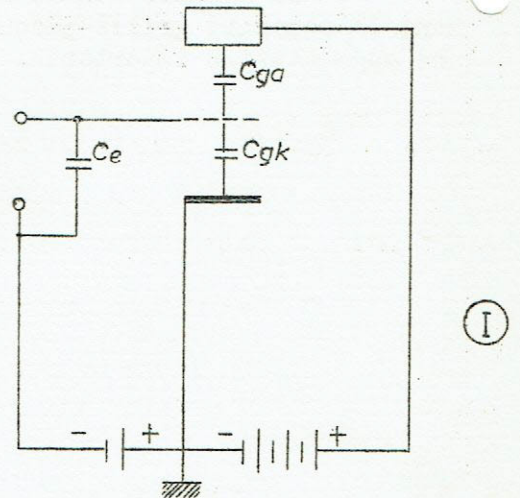
Démonstration de l'expression de C_e .

1°) Le tube n'est pas chargé.

Dans ce cas, la capacité d'entrée est formée par les capacités grille plaque et cathode grille en parallèles comme l'indique le schéma (I) .

On a :

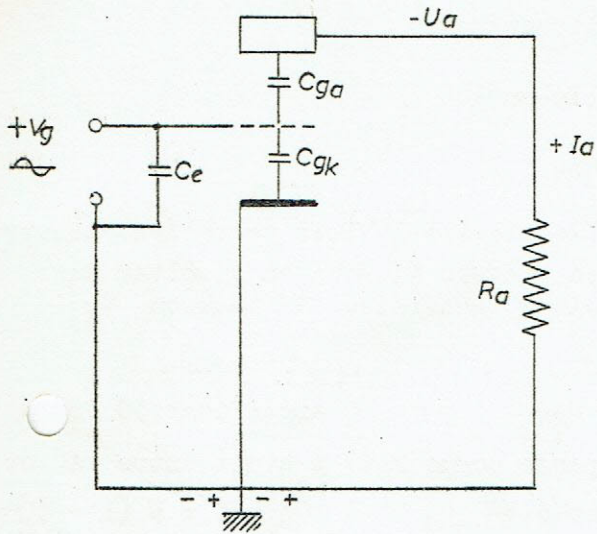
$$C_e = C_{gk} + C_{ga} \quad (1)$$



2°) Le tube est chargé par une résistance R_a .

Dans ce cas, pour trouver la capacité d'entrée, il faut considérer les variations de charge subies par les capacités inter-électrodes lorsque le tube fonctionne comme amplificateur. D'après la relation (1), la somme des variations de charge subies par les capacités interélectrodes est égale à la variation de charge de la capacité d'entrée :

$$\Delta Q C_e = \Delta Q C_{gk} + \Delta Q C_{ga} \quad (2)$$



Pour calculer les diverses variations de charge, on se placera à un instant donné où par exemple le potentiel de grille augmente de $+V_g$. Au même instant, le potentiel de plaque diminue de $-U_a$ d'où les variations de charge.

$$\Delta Q C_e = C_e \times V_g$$

$$\Delta Q C_{gk} = C_{gk} \times V_g$$

$$\Delta Q C_{ga} = C_{ga} [V_g - (-U_a)] = C_{ga}(V_g + U_a)$$

En reportant ces variations dans la relation (2) et en divisant ensuite chaque terme par V_g , on a :

$$C_e V_g = C_{gk} V_g + C_{ga} (V_g + U_a)$$

$$C_e = C_{gk} + C_{ga} (1 + G) \quad \text{puisque } G = \frac{U_a}{V_g}$$

La formule finale montre que la capacité d'entrée et particulièrement la capacité grille-plaque est fonction du gain et subit par conséquent une augmentation importante.

V - LE TUBE TETRODE

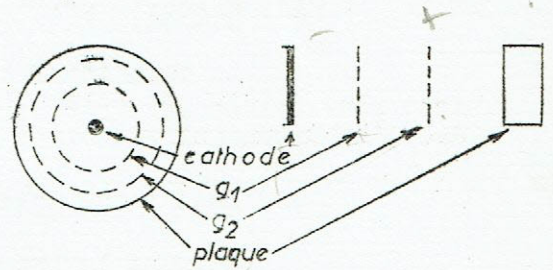
Le tube tétrode est un tube amplificateur constitué de façon d'éviter les inconvénients du tube triode.

Constitution du tube tétrode.

C'est un tube à 4 électrodes concentriques : 2 grilles, 1 cathode et 1 anode.

La première grille ou grille de commande joue le rôle de l'unique grille d'une triode.

La grille-écran ou grille accélératrice : elle est portée à une tension positive continue et fixe vis à vis de la cathode. C'est un écran électrostatique placé entre grille et anode.



Propriétés du tube tétrode.

1°) Grâce à la grande distance qui règne entre la grille de commande et la plaque, la capacité grille plaque est très faible. La présence de l'écran qui constitue la deuxième grille contribue d'ailleurs à l'affaiblir.

2°) Etant donné la grande distance entre plaque et cathode, l'effet attractif de la plaque à l'égard des électrons est relativement faible; il en résulte que ΔU_p n'entraîne qu'un faible ΔI_p . En d'autres termes, la résistance interne du tube tétrode $\rho = \frac{\Delta U_p}{\Delta I_p}$ est grande.

3°) En raison de la présence de l'écran et de la grande distance anode-cathode la capacité C_{ak} est faible d'où le coefficient d'amplification: $K = \frac{C_{gk}}{C_{ak}}$ est très grand.

4°) Grâce à l'effet accélérateur de l'écran, la pente, à courant de plaque égal est un peu plus élevée que dans un tube triode.

Propriétés fondamentales de la deuxième grille.

1°) Rôle accélérateur.

La grille écran, placée sensiblement à la même distance de la cathode que le serait la plaque s'il s'agissait d'une triode, exerce un effet d'attraction à l'égard des électrons émis par la cathode, d'où le nom de grille

accélératrice. Mais la plupart des électrons emportés par leur vitesse dépassent g_2 et parviennent jusqu'à l'anode, beaucoup plus éloignée de la cathode que dans le cas d'une triode ; quelques électrons sont captés par g_2 et contribuent à former un courant d'intensité faible appelé "courant écran".

2°) Rôle d'écran.

La deuxième grille a le rôle d'un véritable écran électrostatique entre la grille et la plaque et contribue ainsi à diminuer la capacité entre la plaque et la grille de commande.

Ordre de grandeur des paramètres du tube tétrode.

1°) Capacité grille plaque.

La capacité grille-plaque d'un tube tétrode est 100 à 1000 fois plus faible que celle d'une triode (0,01 pF). On n'a donc pas à craindre l'inconvénient signalé à propos du tube triode.

2°) Résistance interne.

Suivant le type du tube, la résistance interne est comprise entre une centaine de milliers d'ohms et un mégohm ; la sélectivité dans l'amplification haute fréquence peut être plus satisfaisante que s'il s'agissait d'une triode.

3°) Le coefficient d'amplification.

Il est compris entre 100 et 1000. Une tétrode peut donc donner un gain supérieur à celui d'une triode.

4°) Pente.

Un peu plus élevée que celle d'une triode, elle peut, suivant le cas être comprise entre 1 mA/V et 5 mA/V .

Conclusion:

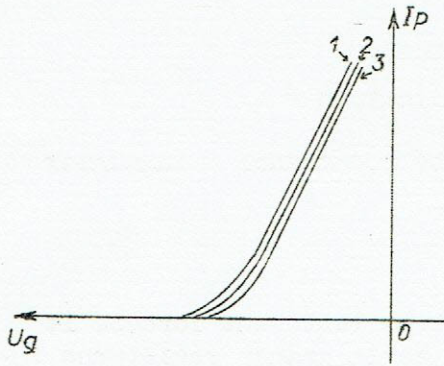
Le tube tétrode peut être effectivement considéré comme un perfectionnement du tube triode ; il est notamment beaucoup plus apte que celui-ci à assurer l'amplification des tensions de haute fréquence.

Remarque :

Dans le tube tétrode, les paramètres dépendent dans une certaine mesure de la tension continue d'écran.

Réseau de courbes $I_p - U_g$ d'une tétrode.

Chacune des courbes établies pour une tension de plaque particulière présente la même forme que dans le cas d'une triode ; mais étant donné la faiblesse des variations du courant plaque consécutives aux variations de la



tension plaque, les courbes correspondant aux diverses tensions de plaque sont presque confondues.

Exemple :

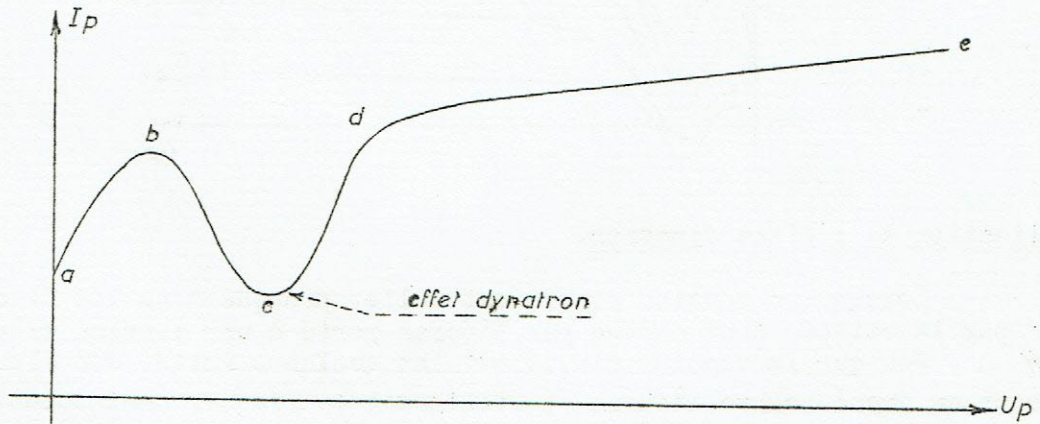
- 1 : courbe pour $U_p = 300$ volts
- 2 : " " $U_p = 200$ "
- 3 : " " $U_p = 100$ "

Remarque :

Il importe de noter que la ou les caractéristiques considérées ne sont valables que pour une tension d'écran déterminée.

Courbe $I_p - U_p$ d'un tube tétrode.

Fixons la tension d'écran et celle de la grille de commande g_1 à des valeurs déterminées : U_{g1} et $U_{g2} = \text{constantes}$



Faisons varier U_p à partir de 0 et contrôlons les valeurs que prend successivement I_p : nous en déduisons une courbe qui est la courbe $I_p - U_p$ du tube dans les conditions considérées. Elle diffère de celle d'une triode. Nous y distinguons 3 parties :

1°) Partie a b :

Les premières augmentations de U_p conduisent rapidement à de grandes valeurs de I_p .

2°) Partie b c d :

Lorsque la tension de plaque s'approche de la valeur de la tension d'écran I_p décroît suivant b c.

L'espace anode-cathode de la tétrode se conduit en "résistance négative" c'est-à-dire en résistance telle que U et I varient en sens

contraire (ΔU_p et ΔI_p sont de signe contraire).

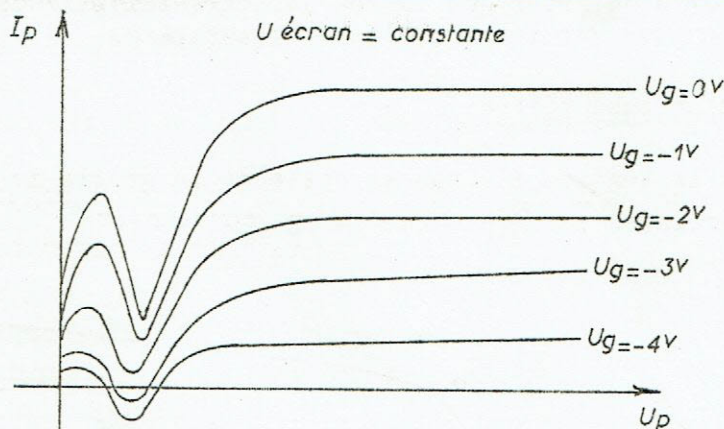
Ce phénomène est " l'effet dynatron " .

Enfin, à partir du point c l'intensité recommence à augmenter très rapidement jusqu'à d .

3°) Partie d e :

L'intensité de plaque croît alors très lentement lorsque la tension de plaque augmente, c'est la conséquence de la grande résistance interne présentée par le tube tétrode. En pratique c'est dans la région rectiligne d-e qu'est utilisé le tube tétrode.

Réseau $I_p - U_p$ pour différentes valeurs de la tension grille.



Explication de l'effet dynatron.

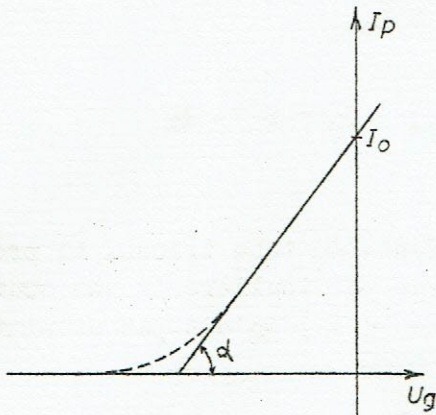
Lorsque la tension plaque est nulle, presque tous les électrons émis par la cathode sont captés par l'écran porté à une tension élevée donc $I_p \neq 0$. Dès que la tension plaque atteint quelques volts, des électrons dépassent en grand nombre l'écran et atteignent la plaque, contribuant ainsi à faire croître le courant de plaque.

Dès que la vitesse électronique est devenue telle que le bombardement de la plaque développe une énergie importante, des électrons secondaires rejaillissent de l'anode. Ceux-ci se dirigent alors vers l'électrode dont la tension est la plus élevée, c'est-à-dire l'écran.

Les charges amenées à la plaque en une seconde par les électrons primaires tendent à être compensées par les charges soustraites à la plaque par les électrons secondaires ; c'est ce qui explique la diminution de I_p dans la région b c lorsque U_p augmente.

Mais lorsque la tension de plaque approche la tension d'écran, l'atteint puis la dépasse, les électrons secondaires reviennent alors spontanément sur la plaque qui les a émis et le phénomène disparaît.

Equation d'un tube tétrode dans les régions rectilignes des caractéristiques.

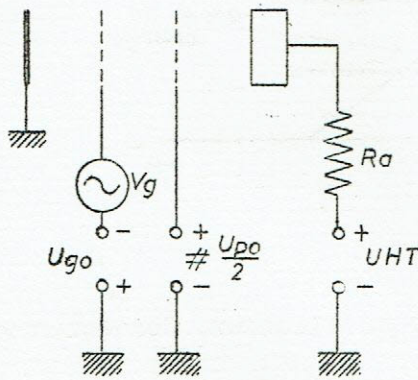


Etant donnée la grande résistance interne, on sait que les caractéristiques statiques $I_p - U_g$ sont pratiquement confondues en une seule. L'équation de la tétrode peut donc se mettre sous la forme simple suivante, valable pratiquement quelle que soit la tension plaque.

$$I_p = S U_g + I_0$$

C'est bien, en effet l'équation d'une droite de coefficient angulaire $\text{tg } \alpha = S$ et l'ordonnée à l'origine I_0 . D'une façon générale I_0 peut être déterminé à partir d'un état caractéristique ou bien est donné comme une constante du tube.

Montage et organisation d'un étage amplificateur équipé d'une tétrode.



On trouve dans le circuit de plaque une résistance de charge R_a aux bornes de laquelle apparaît la tension amplifiée. La grille de commande g_1 est soumise d'une part au signal incident et d'autre part à la source de polarisation négative.

L'écran doit, pour jouer son rôle accélérateur, être porté à une tension positive relativement importante mais pour éviter les inconvénients de l'effet dynatron, on donne à la tension d'écran, une valeur sensiblement égale à la moitié de la tension continue de plaque U_{po} . (voir l'alimentation pratique des diverses électrodes au chapitre VI : le tube penthode).

Gain d'amplification d'un tube tétrode.

Les formules caractérisant le fonctionnement de la tétrode sont issues de celles valables pour la triode et simplifiées en raison de l'importance de la résistance interne.

a) Courant alternatif de plaque.

On a : $I_a = \frac{K V_g}{R_a + \rho}$ dans la plupart des cas on a : $\rho \gg R_a$ et il reste pratiquement :

$$I_a = \frac{K V_g}{\rho} \approx \underline{S \cdot V_g}$$

b) Tension de sortie : $U_a = R_a \cdot I_a = S V_g \cdot R_a$

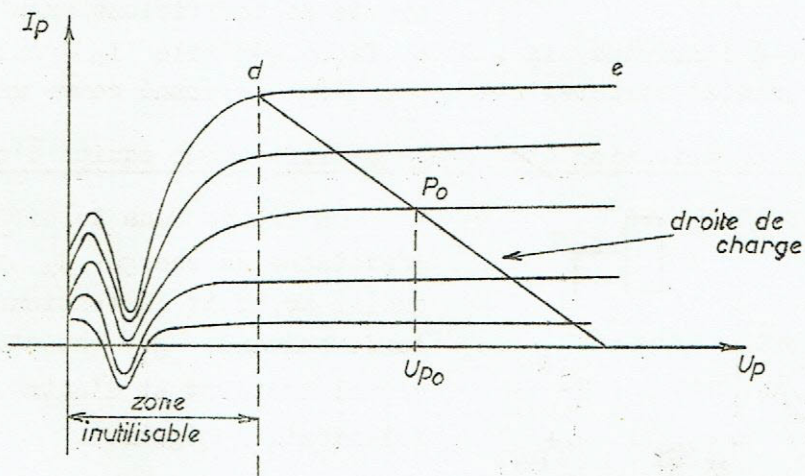
c) Gain :

$$\text{On a : } G = \frac{K R_a}{R_a + \rho} \neq \frac{K R_a}{\rho} = S R_a$$

En résumé : $I_a = S \cdot V_g$; $G = S \cdot R_a$; $U_a = S V_g R_a$

Inconvénient.

Si le tube tétrode porte remède aux défauts du tube triode, il présente lui-même un inconvénient important ; la forme particulière de ses courbes $I_p - U_p$. Tant que la partie rectiligne (zone d e) n'est pas atteinte, il y a risque de distorsion.



Il y a donc une zone inutilisable en amplificateur. Conséquences :

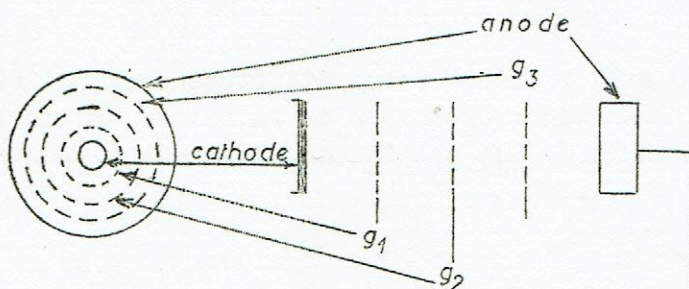
- a) obligation de choisir une tension plaque U_{p0} élevée.
- b) déplacements du point P_0 limités ce qui ne permet pas d'utiliser ce tube comme amplificateur de puissance.

N.B. Ne pas confondre les tubes modernes tétrodes amplificateurs de puissance et le tube tétrode décrit précédemment. Les tubes tétrodes actuels sont en effet construits de manière à ne pas présenter l'effet dynatron (voir plus loin, chapitre VIII : tubes spéciaux).

VI - LE TUBE PENTHODE (ou PENTODE)

Le tube penthode est un tube amplificateur constitué de façon à éviter l'inconvénient du tube tétrode : effet dynatron.

Constitution du tube penthode .



Le tube penthode est constitué de 5 électrodes concentriques : une cathode (chauffage direct ou indirect), 3 grilles et une anode.

La première grille (g_1) ou grille de commande est soumise aux oscillations incidentes comme dans le cas de la triode ou de la tétrode.

La deuxième grille (g_2) est la grille écran ou grille accélératrice ; elle joue le même rôle que dans le tube tétrode.

La troisième grille (g_3) est située entre l'écran et l'anode et présente un pas relativement lâche ; elle est généralement réunie intérieurement ou extérieurement à la cathode.

Rôle joué par g_3 .

En raison du pas très lâche de g_3 , les électrons primaires accélérés par l'écran et animés d'une grande vitesse ne subissent pratiquement aucun effet de ralentissement de la part de g_3 .

En revanche les électrons secondaires émis par la plaque et qui ont tendance à se diriger vers g_2 , contribuant ainsi à former l'effet dynatron, sont en raison de leur faible vitesse arrêtés par g_3 qui, réunie à la cathode exerce à leur égard un effet répulsif. g_3 est appelée " grille suppressive " ou " suppressor ". D'autre part g_3 contribue à diminuer encore la capacité grille plaque.

Propriétés du tube penthode.

Les mêmes que le tube tétrode grâce à l'écran qui joue les rôles fondamentaux étudiés précédemment.

Paramètres caractéristiques du tube penthode.

On peut donner comme ordre de grandeur :

Résistance interne : $\rho = 500 \text{ k}\Omega$ à $3 \text{ M}\Omega$

Coefficient d'amplification : $K = 500$ à 3000

Pente : $S = 1$ à 5 mA/v

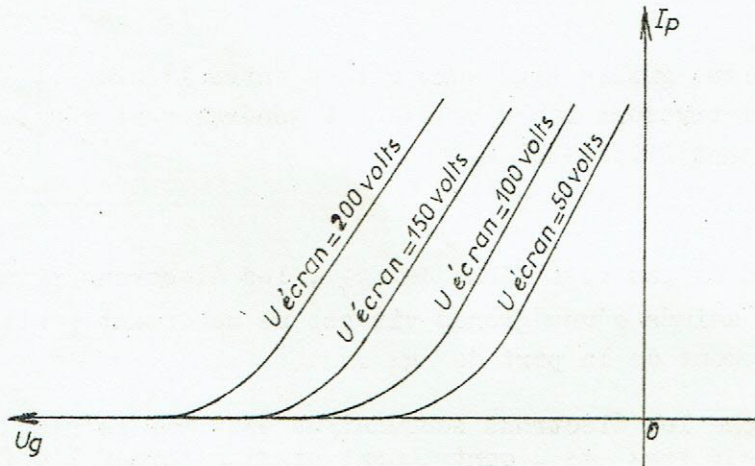
Capacité grille-anode : $C_{gG} =$ quelques millièmes de picofarads

Réseau $I_p - U_g$.

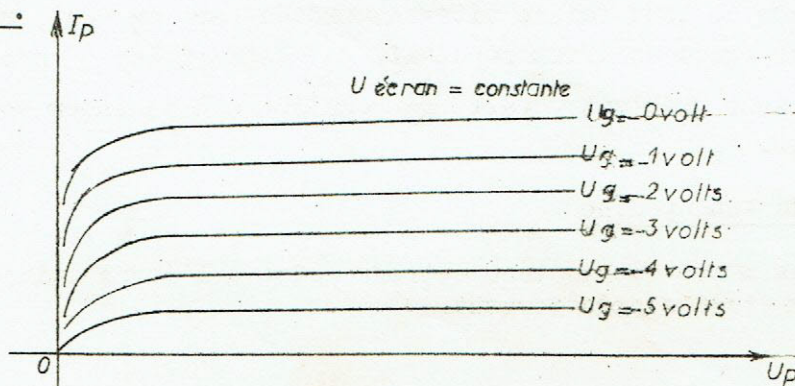
Tout comme dans le cas de la tétrode les différentes caractéristiques statiques $I_p - U_g$ sont confondues en raison de la valeur énorme de la résistance interne. La pente dynamique est pratiquement égale à la pente statique.

Action de la tension écran.

La deuxième grille présente, vis-à-vis de la cathode, le même effet que la plaque d'une triode. Pour obtenir différentes courbes dans le réseau $I_p - U_g$, c'est donc sur la tension écran et non sur la tension plaque qu'il faut agir. Cette remarque est valable également pour le tube tétrode.



Réseau $I_p - U_p$.



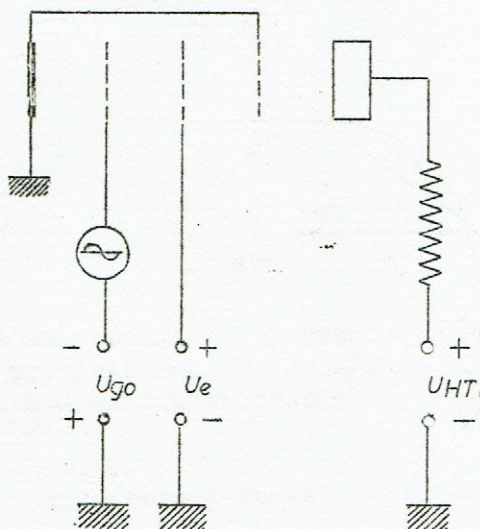
Equation de la penthode dans les régions rectilignes des caractéristiques.

C'est la même que celle du tube tétrode I_0 étant une constante dépendant de la tension d'écran. On a :

$$I_p = S U_g + I_0$$

Le courant plaque est indépendant de la tension plaque.

Organisation d'un étage amplificateur équipé d'un tube penthode.



Dans les utilisations normales la 3^{ème} grille est réunie à la cathode. Quand à l'écran puisqu'il n'y a pas à craindre l'effet dynatron il pourrait être porté à la tension de plaque. Ce qui vient, en général, limiter la valeur de la tension d'écran, c'est d'une part la puissance maximum qu'il peut dissiper et d'autre part l'intensité plaque maximum au-delà de laquelle le tube risque la destruction. Le plus souvent d'ailleurs on utilise pour alimenter l'écran,

la source de haute tension plaque convenablement abaissée à l'aide d'une résistance.

Détermination numérique des conditions de fonctionnement d'un tube penthode amplificateur.

On a :

$$1^\circ) I_a = \frac{K V_g}{\rho + R_a} \quad \text{d'où puisque } R_a \ll \rho \quad I_a = S \cdot V_g$$

$$2^\circ) U_a = R_a I_a$$

$$3^\circ) G = \frac{K R_a}{\rho + R_a} \quad \text{d'où } G = S \cdot R_a$$

$$4^\circ) \text{ Enfin : } U_a = G V_g = S \cdot R_a \cdot V_g$$

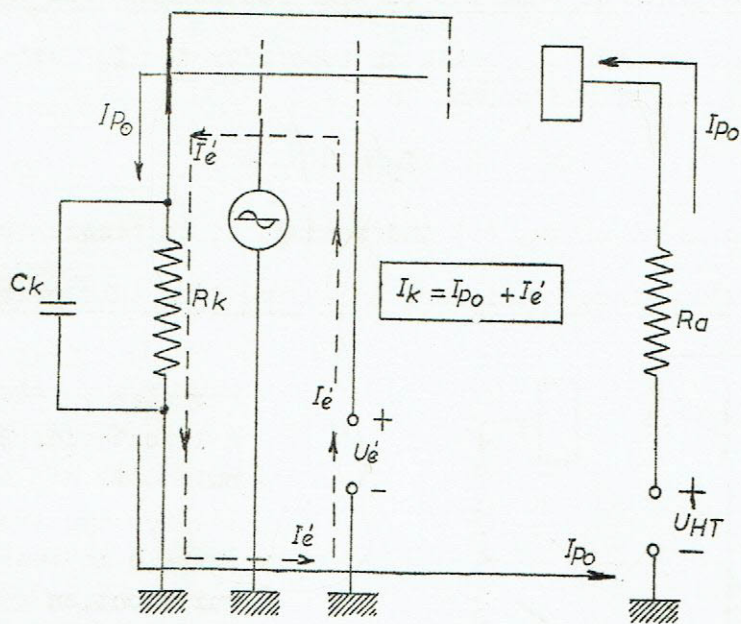
Remarque :

On prendra bien soin de n'utiliser les formules simplifiées :

$$I_a = S V_g \quad \text{et} \quad G = S \cdot R_a$$

qu'après s'être assuré que l'on a effectivement $R_a \ll \rho$.

Auto-polarisation du tube penthode (ou tétrode).

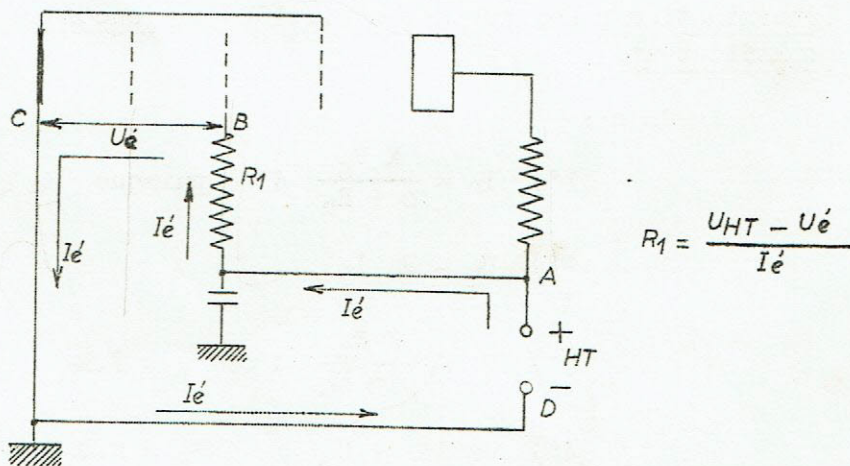


L'auto-polarisation de la penthode est couramment obtenue comme dans le cas de la triode par une résistance découplée par un condensateur dans le circuit de cathode. On remarque que le courant de cathode est la somme du courant de plaque et du courant d'écran.

L'auto-polarisation de la grille de commande est donnée par:

$$U_{g0} = - R_K I_K = - R_K (I_{p0} + I_{e'})$$

Alimentation de l'écran.



a) Par simple résistance série :

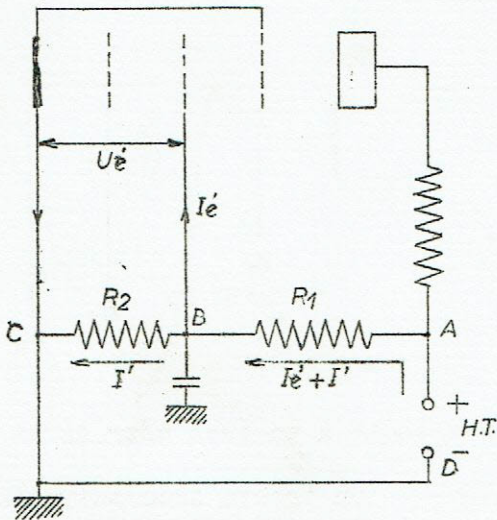
On utilise le courant inévitable d'écran pour créer une chute de tension dans la résistance R_1 et amener la tension d'écran à la valeur souhaitée. La tension entre écran et cathode est évidemment U_{BC} . Dans la maille

A B C D on a :

$$U_{HT} = R_1 I_{\acute{e}} + U_{BC} = R_1 I_{\acute{e}} + U_{\acute{e}} \quad \text{d'où :}$$

$$U_{\acute{e}} = U_{HT} - R_1 I_{\acute{e}}$$

b) Par diviseur de tension (pont).



Le montage précédent présente un inconvénient : toute variation accidentelle du courant d'écran $I_{\acute{e}}$ entraîne une importante variation de la tension d'écran, ce qui est une conséquence indésirable. L'utilisation des deux résistances R_1 et R_2 montées en diviseur de tension permet de remédier à cet inconvénient. Dans la maille A B C D on a :

$$U_{HT} = R_1 (I_{\acute{e}} + I') + R_2 I'$$

Or $R_2 I'$ exprime la tension entre B et C, c'est-à-dire la tension d'écran. Celle-ci est donc donnée par :

$$R_2 I' = U_{\acute{e}} = U_{HT} - R_1 (I_{\acute{e}} + I')$$

On voit ainsi que la tension d'écran est d'autant plus indépendante que l'intensité d'écran, que I' est plus grande vis-à-vis de $I_{\acute{e}}$. Les résistances R_1 et R_2 doivent donc être déterminées en fonction du rapport $\frac{I'}{I_{\acute{e}}}$ désiré (On prend habituellement un rapport 2 à 3 ; autrement dit $I' = 2$ à $3 I_{\acute{e}}$).

Rôle de $C_{\acute{e}}$:

Pour que l'écran joue son rôle il importe que sa tension reste le plus stable possible. Or les variations de la tension de grille de commande sous l'effet de la tension incidente entraînent des variations du courant d'écran. Pour que ces dernières n'entraînent pas à leur tour des variations de la tension d'écran, il faut entre le point B et la masse un condensateur $C_{\acute{e}}$ de réactance négligeable vis-à-vis de la résistance R_1

(et éventuellement vis-à-vis de $\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ dans le cas b)

Cette condition doit évidemment être satisfaite à la plus basse fréquence amplifiée. En pratique on donne à $C_{\acute{e}}$ une valeur telle que l'on ait :

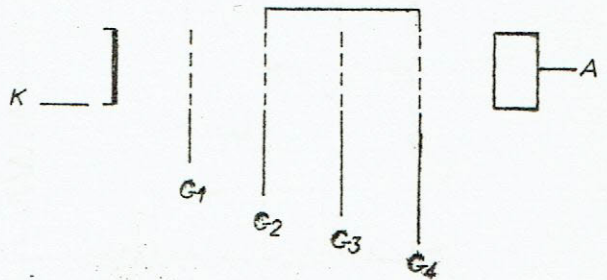
$$\frac{1}{C_{\acute{e}} \cdot \omega} \ll \frac{R_1}{10}$$

VII - TUBES COMPORTANT PLUS DE CINQ ELECTRODES

Les tubes comportant plus de cinq électrodes ont généralement été conçus pour des emplois spéciaux. On doit surtout les considérer comme des cas particuliers des tubes précédents. Exemples :

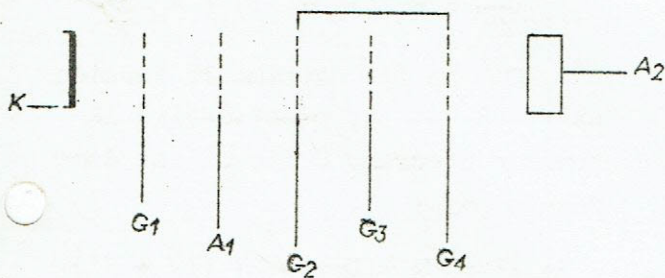
1°) Hexode :

C'est un tube tétrode comportant deux grilles de commande (G_1 et G_3) et un écran double (G_2 et G_4) séparant les diverses électrodes au point de vue électrostatique.



2°) Heptode :

Peut se comparer à un tube triode associé à un tube tétrode et comportant une cathode commune.

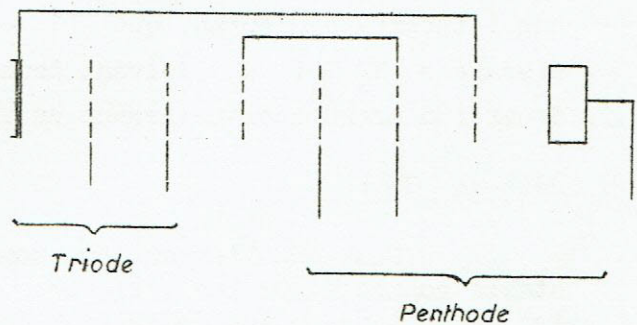


On trouve successivement :

- G_1 : grille de commande " triode "
- A_1 : anode " triode "
- G_2-G_4 : écran double.
- G_3 : grille de commande " tétrode "
- A_2 : anode " tétrode ".

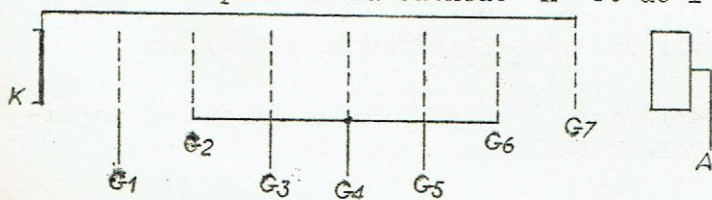
3°) Octode :

Equivalent à un tube triode associé à un tube penthode. Le tube comporte donc une grille de freinage ou " suppressor " en plus du tube heptode.



4°) Nonode :

Tube à usage particulier (modulation de fréquence) comportant 7 grilles en plus de la cathode K et de l'anode A. Les grilles G_1 , G_3 et G_5 sont des grilles de commande.



Les grilles G_2 , G_4 et G_6 forment un écran triple.

La grille G_7 est un " suppressor " relié à la cathode.

Tubes combinés.

Il s'agit de l'association, dans la même ampoule, de deux, trois ou même quatre tubes. Ce groupement a surtout des raisons d'ordre pratique.

Exemple : double valve ou valve biplaque pour le redressement double alternance etc...

Toutes les combinaisons sont possibles, nous citerons quelques exemples :

Double valve ou valve biplaque : 6 x 4

Double triode : 12 A U 7

Double diode - penthode : U B F 80

Triode - heptode : E C H 81

Triode - penthode: 6 x 8

Triple diode - Triode : E A B C 80 etc...

VIII - TUBES SPECIAUX

Ils sont extrêmement nombreux ; les progrès de la technique ont en effet abouti à la création d'un tube et souvent de plusieurs tubes pour chaque fonction alors qu'à l'origine, toutes les fonctions devaient être remplies par le " tube triode. Il est donc impossible de décrire ici tous les tubes spéciaux. Nous ferons seulement mention de quelques uns de ces tubes devenus classiques par leur emploi fréquent.

Une étude très sommaire accompagnera chaque tube ; on donnera des détails techniques lors des chapitres ultérieurs lorsque de tels tubes seront utilisés ; on trouvera des détails pratiques dans les catalogues édités par les constructeurs.

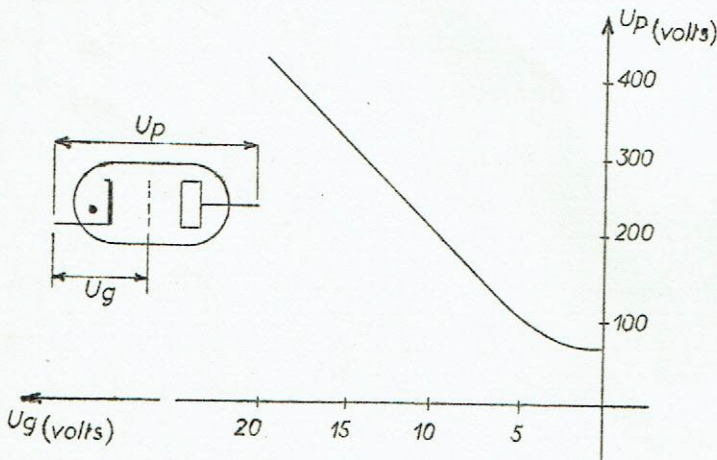
1°) Valves spéciales.

Voir fascicule " Redresseurs et filtres " pages 8 à 10.

2°) Thyratron.

C'est un tube à trois électrodes que l'on peut comparer à une valve à gaz munie d'une grille de commande. Cette grille permet de régler la tension d'ionisation du thyatron : plus la tension grille est négative, plus il faudra une tension plaque élevée pour ioniser le gaz contenu dans l'ampoule.

Courbe $U_p = f(U_g)$.

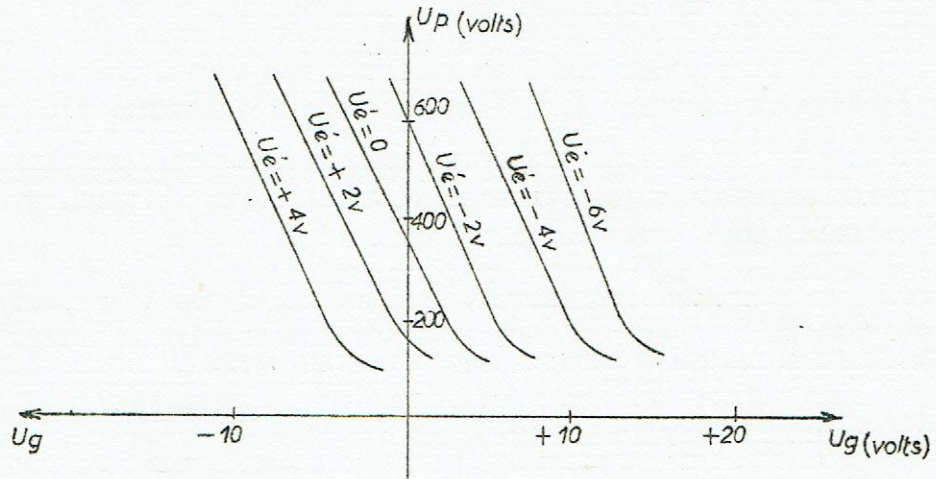


Cette courbe donne la valeur de la tension plaque nécessaire à l'amorçage du tube en fonction de la tension de la grille de commande.

On notera qu'à partir du moment où le tube est ionisé, la grille ne commande plus le courant plaque. Pour réduire le courant plaque et en particulier pour désamorcer le tube, il faut réduire la tension plaque.

Thyratron type " tétrode " .

La présence d'une grille écran permet d'obtenir un réseau de courbes $U_p - U_g$, le paramètre caractéristique de chaque courbe étant la tension écran.



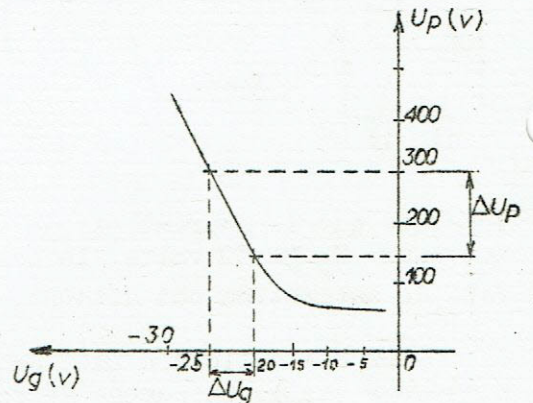
Rapport de commande.

C'est une grandeur sensiblement constante correspondant au coefficient d'amplification du tube triode.

C'est le rapport entre la variation de tension plaque et la variation de tension grille correspondante, nécessaire pour maintenir le tube à la limite de l'amorçage.

Exemple :

$$k = \frac{\Delta U_p}{\Delta U_g} = \frac{150}{5} = \boxed{30}$$



Durées d'ionisation et de désionisation:

Ces temps nécessaires à l'amorçage et au désamorçage d'un thyatron sont très brefs ; ils ne sont cependant pas négligeables dans la plupart des applications. Ils sont indiqués par les constructeurs et dépendent du type de tube et de la température.

Ordres de grandeur :

Durée d'ionisation : quelques microsecondes.

Durée de désionisation: 10^{-3} à 10^{-4} seconde .

Bibliographie :

Voir " Les tubes électroniques à gaz " par Lucien CHRETIEN (Editions Chiron).

3°) Cellules photo-électriques.

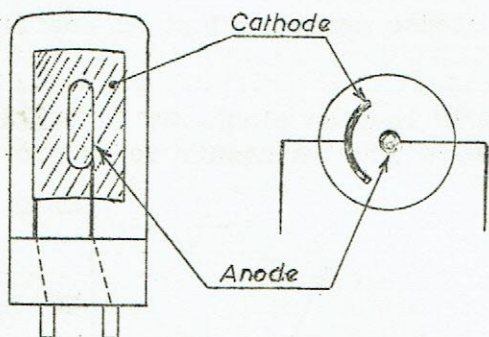
D'une façon générale, on peut dire que ce sont des tubes à deux électrodes émettant des électrons sous l'influence d'un rayon lumineux.

Il faut cependant en distinguer plusieurs types : les cellules photo-émissives (à vide ou à gaz), les cellules photo-résistantes et les cellules photo-voltaïques.

Ce sont surtout les premières que l'on peut considérer comme de véritables tubes diodes dont l'émission électronique est due à l'éclairement de la cathode et non plus à son chauffage.

a) Cellules photo-émissives.

Leur cathode, de grande dimension, est formée d'une plaque d'argent recouverte de matière émissive (oxyde de caesium). L'anode est une simple tige ou un anneau métallique destiné à capter les électrons si on le porte à un potentiel plus positif que la cathode.



Ces deux électrodes sont placées dans une ampoule où règne un vide poussé.

Dans certains cas, au contraire, on introduit dans l'ampoule un gaz inerte sous faible pression, dans le but d'augmenter la sensibilité.

Caractéristique $I_p - U_p$.

constate que le courant plaque croît en fonction de la tension plaque, mais que pour $U_p > 50$ volts, le courant de saturation est atteint.

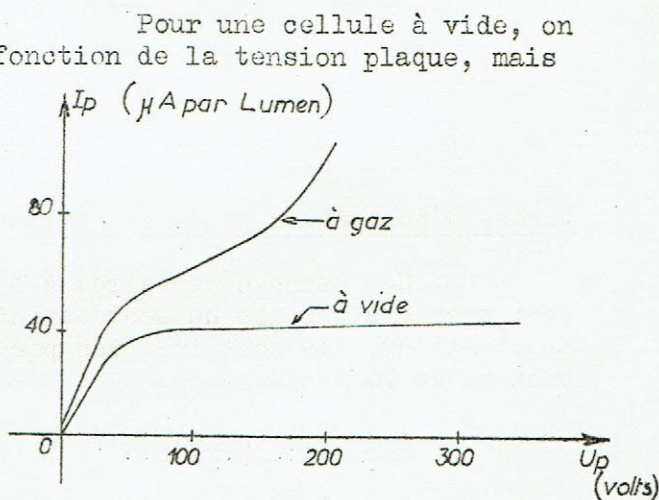
Pour une cellule à gaz, on n'observe pas le phénomène de saturation.

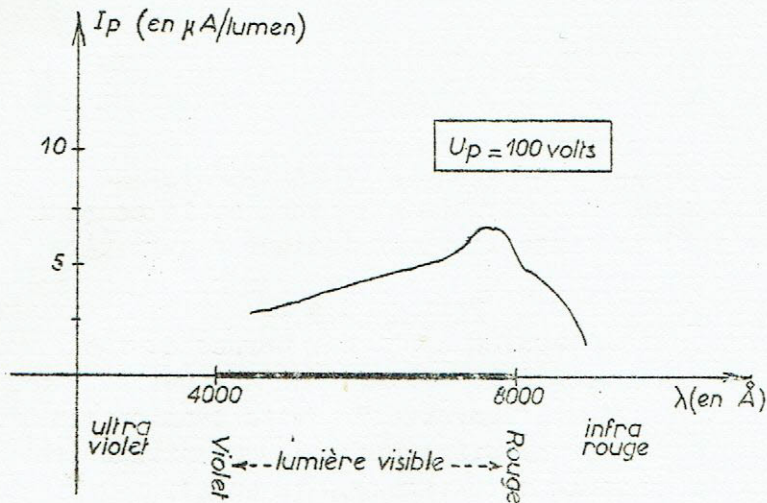
Dans les deux cas, le courant plaque étant fonction de l'éclairement est donné en microampères par lumen.

Sensibilité spectrale.

Les cellules photo-émissives ont un courant plaque variant, non seulement avec l'intensité lumineuse, mais également en fonction de la longueur d'onde du rayonnement.

On appelle courbe de sensibilité spectrale, la courbe donnant le courant plaque (en μA par lumen) en fonction de la longueur d'onde du rayonnement, pour une tension plaque donnée.



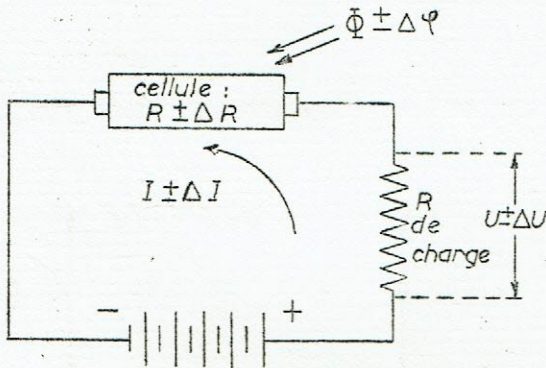


On peut remarquer, par exemple, qu'une cellule photo-électrique peut aussi être sensible à des rayonnements invisibles tel que l'infra-rouge ($\lambda > 8000 \text{ \AA}$). Un Angström = 10^{-8} cm).

b) Cellules photo-résistantes
(ou photo-conductrices)

Elles se comportent comme des résistances variant en fonction de l'intensité lumineuse. Le corps utilisé est généralement du sélénium déposé sur une plaque isolante.

Si l'éclairement varie, on aura une variation de résistance du circuit où est introduite la cellule. Il en résultera une variation d'intensité permettant d'obtenir une variation de tension aux bornes d'une résistance de charge.

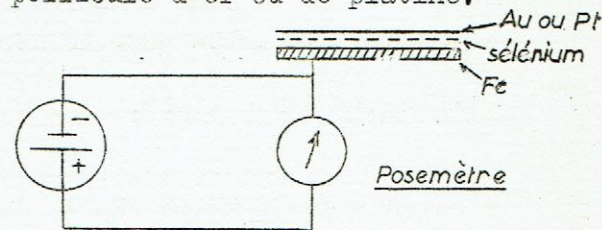


La variation de tension suivra la même loi que la variation d'éclairement à condition toutefois que ces variations ne soient pas trop rapides, à cause de l'inertie de ce type de cellules.

c) Cellules photo-voltaïques
(ou photo-piles)

Ce sont de véritables piles fournissant une force électromotrice qui est fonction de l'éclairement. Elles sont en général constituées par une électrode en fer sur laquelle est déposé du sélénium, lui-même recouvert par une mince pellicule d'or ou de platine.

Le courant obtenu est suffisant pour faire dévier un galvanomètre d'où l'emploi de ces cellules en photométrie.



4°) Tubes stabilisateurs ou régulateurs.

Ces tubes sont destinés à stabiliser la tension fournie, ou le courant débité par une source d'alimentation.

a) Tubes stabilisateurs à gaz.

Ils sont constitués de deux électrodes placées dans une ampoule contenant un gaz inerte. La cathode est recouverte d'oxydes émissifs ; la pression

du gaz est de l'ordre de quelques centimètres de mercure.

Caractéristique tension-courant.

Si on applique au tube une tension croissante E à travers une résistance R , en contrôlant la tension U aux bornes du tube et le courant I , on constate que la courbe $U = f(I)$ présente l'aspect indiqué figure ①.

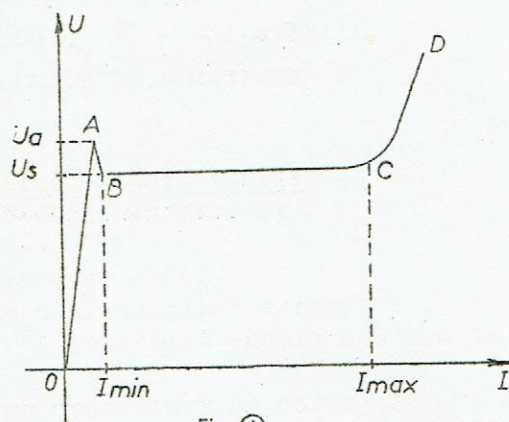


Fig ①

Partie O A :

La tension croît aux bornes du tube jusqu'à la valeur U_a qui est la "tension d'amorçage". Cette tension est une caractéristique du gaz utilisé (environ 70 volts pour le néon).

Partie B C :

Lorsque le gaz est ionisé, la tension aux bornes du tube reste sensiblement constante (U_s), même si le courant varie.

Partie C D :

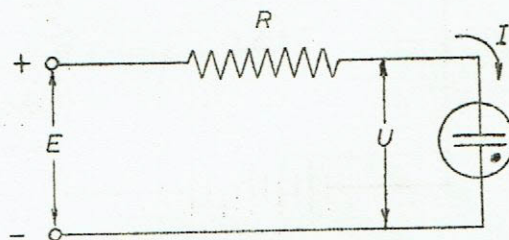
Lorsque l'ionisation est totale, une nouvelle augmentation de courant se traduit par une augmentation de tension aux bornes du tube: on est sorti de la zone de fonctionnement normal.

On notera que l'amorçage du tube dépend du champ électrostatique dû à la différence de potentiel entre anode et cathode ainsi qu'à un effet photo-électrique et à un effet radioactif. La valeur de la tension d'amorçage est une caractéristique du gaz contenu dans l'ampoule (70 volts pour le néon).

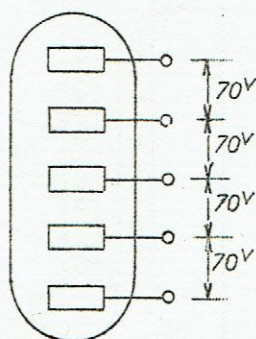
Différents tubes à gaz.

Il existe des tubes simples contenant un éclateur permettant ainsi d'obtenir une tension stable de 70 volts, si le gaz utilisé est le néon ; exemple : le tube stabilovolt 75/15 (L.M.T.).

Pour des tensions supérieures, il est possible de grouper plusieurs tubes en série, mais on peut aussi utiliser des tubes contenant plusieurs éclateurs dans la même ampoule ; exemple : le tube " stabilovolt " 280/40 (L.M.T.).



Montage permettant le relevé de la courbe courant tension.



TUBE 280/40

Dans ce tube, 4 éclateurs permettent de stabiliser une tension de 4×70 soit 280 volts.

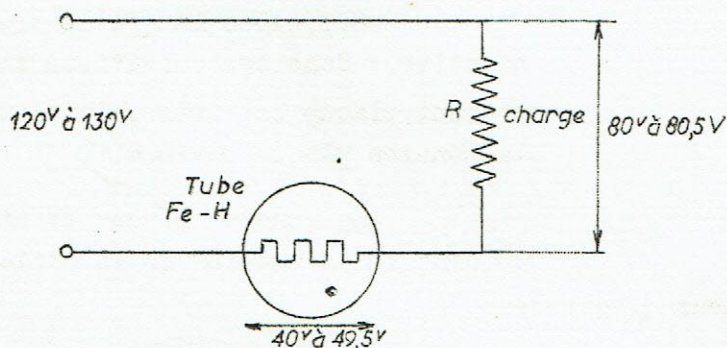
Ces tubes sont parfois appelés :
 potentiomètres à décharge lumineuse .

b) Tube régulateur " Fer-Hydrogène "

Il est constitué par un filament de fer placé dans une ampoule contenant de l'hydrogène. Ce tube se comporte comme une résistance variant automatiquement avec le courant qui la traverse. La résistance du filament métallique varie en effet avec la température suivant la loi :

$$R(t^\circ) = R(0^\circ)(1 + \alpha t)$$

Si α est positif, la résistance augmente avec la température qui est elle même fonction du courant. Le tube a donc tendance à maintenir constant le courant dans un circuit et, par là même la tension aux bornes d'une résistance de charge qui aurait été placée en série avec le tube.



Exemple :

Si la tension de la source passe de 120 à 130 V, le courant a tendance à croître, ce qui augmente la résistance du tube et, par conséquent, la tension à ses bornes qui passe, par exemple de 40 volts à 49,5 volts.

Il en résulte une tension stable aux bornes de la charge puisque la valeur est passée de 80 volts à 80,5 volts, soit environ 0,6% seulement de variation.

Nota.

L'emploi des tubes stabilisateurs et les calculs relatifs aux stabilisations obtenues seront étudiés au chapitre des alimentations stabilisées.

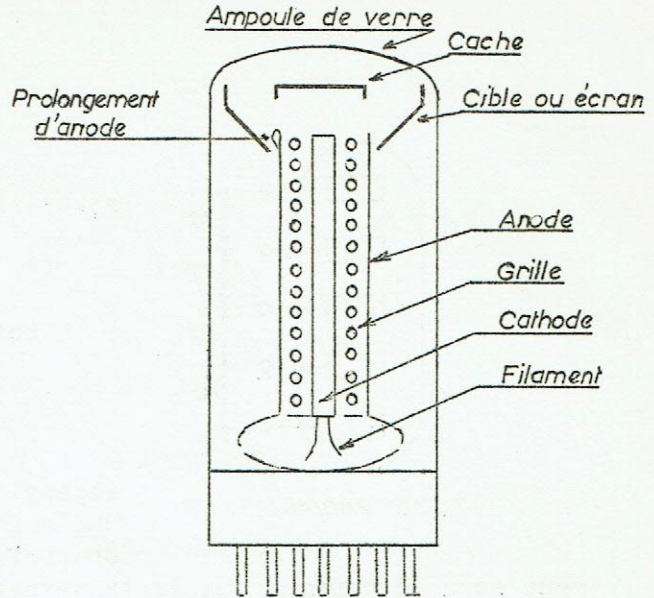
5°) Indicateurs visuels d'accord.

Ces tubes sont destinés à traduire visuellement l'équilibre ou l'accord d'un appareil de mesure, d'un récepteur de radio etc...

a) L'oeil magique.

Les électrons émis par la cathode et commandés par la grille sont dirigés vers un écran encore appelé " cible ". Cette électrode est recouverte d'une matière fluorescente qui développe une luminescence sous l'effet du bombardement électronique (luminescence verte pour un dépôt à base d'oxyde de zinc et de silicate de manganèse).

Le tube comprend également une anode munie d'un prolongement métallique. Entre ce prolongement et l'écran se produira un champ plus ou moins intense provoquant une déviation plus ou moins importante des électrons d'où apparition sur l'écran d'un secteur d'ombre variable.



Fonctionnement.

La cible étant réunie à la haute tension, on charge l'anode par une forte résistance :

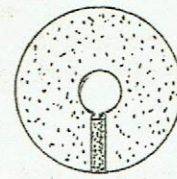
$$(R_p = 1 \text{ à } 2 \text{ M}\Omega)$$

Supposons la grille très négative ; dans ces conditions le courant plaque est très faible et la tension plaque maximum.

La tension plaque étant voisine de la tension de la cible

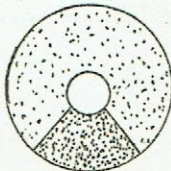
le champ électrique entre ces deux électrodes est pratiquement nul.

Les électrons bombardent l'écran qui apparaît lumineux, sauf un très petit secteur d'ombre dû au prolongement d'anode.



U_g très négative
Secteur d'ombre étroit

Dans le cas contraire, si on avait $U_g = 0$ volt, le courant plaque serait plus intense et la tension plaque très faible. Il existerait entre la plaque et la cible un champ électrique important déviant les électrons au voisinage du prolongement d'anode d'où un secteur d'ombre maximum.



$U_g \neq 0$. Secteur d'ombre maximum

C'est donc en agissant sur la tension négative de la grille de commande qu'on

obtient l' "ouverture " ou la " fermeture " de l'oeil magique.

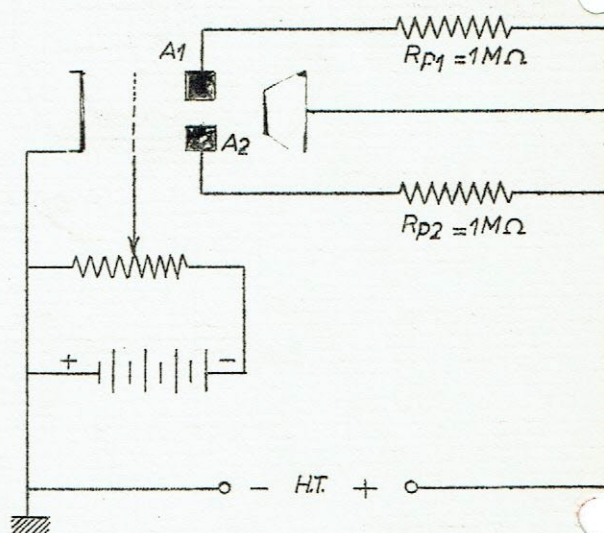
b) Le trèfle cathodique.

Identique à l'oeil magique, mais l'anode comporte quatre prolongements au lieu d'un seul. Il se forme donc quatre secteurs d'ombre en forme de trèfle à quatre feuilles.

c) Le trèfle cathodique à double sensibilité.

Le débit électronique est commandé par une grille à double pas. Le tube comporte deux anodes A_1 et A_2 ayant chacune deux prolongements autour desquels s'effectuent les variations de luminosité sur la cible reliée à la haute tension.

Les deux pas de la grille permettent d'avoir deux sensibilités. On observera par exemple, la fermeture complète de deux feuilles du trèfle pour $U_g = - 8$ volts avec la grille à pas serré, tandis qu'il faudra pousser jusqu'à $U_g = - 18$ volts pour fermer les deux autres feuilles.



6°) Tétrade à distance critique (ou à faisceaux dirigés).

But : Obtenir des courbes caractéristiques $I_p - U_p$ présentant un minimum de parties coudées et pouvant, par conséquent, subir de fortes variations de tension plaque sans distorsion.

Principe : La grille supprimeuse, cause de freinage des électrons primaires est éliminée. Cependant, pour ne pas retomber dans le cas du tube tétrade ordinaire, on évite le retour des électrons secondaires vers l'écran par les deux moyens suivants :

a) la distance plaque cathode est convenablement choisie (travaux de J.O.Harries) d'où le nom de tube à distance critique.

b) les électrons sont concentrés en deux faisceaux dont la densité rend difficile le retour en arrière des électrons secondaires.

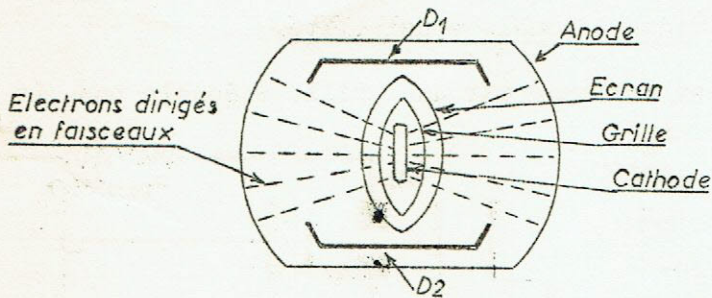
Réalisation.

La cathode, la grille et l'écran ont une forme elliptique, ou simplement aplatie d'où émission d'électrons en deux faisceaux.

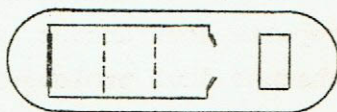
Deux plaques portées au potentiel de la cathode favorisent encore la concentration électronique (D_1 et D_2). Enfin l'anode placée à une distance convenable de la cathode capte les électrons primaires.

Pour parfaire l'effet de concentration, la grille de commande et l'écran peuvent être " alignés " (voir coupe verticale).

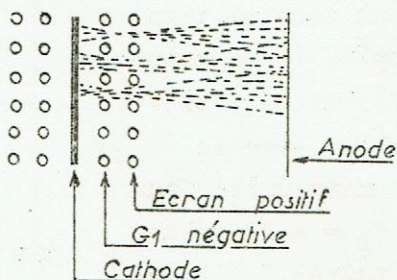
COUPE HORIZONTALE



REPRESENTATION SCHEMATIQUE

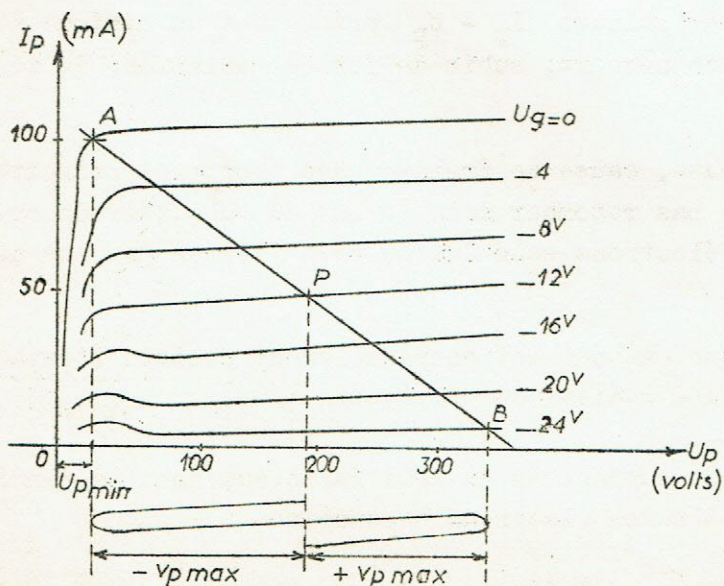


TUBE À DISTANCE CRITIQUE



COUPE VERTICALE

Courbes $I_p - U_p$.



Le réseau ci-contre sur lequel on a placé une droite de charge montre que le point de repos peut se déplacer jusqu'en A avec une distorsion minimum :

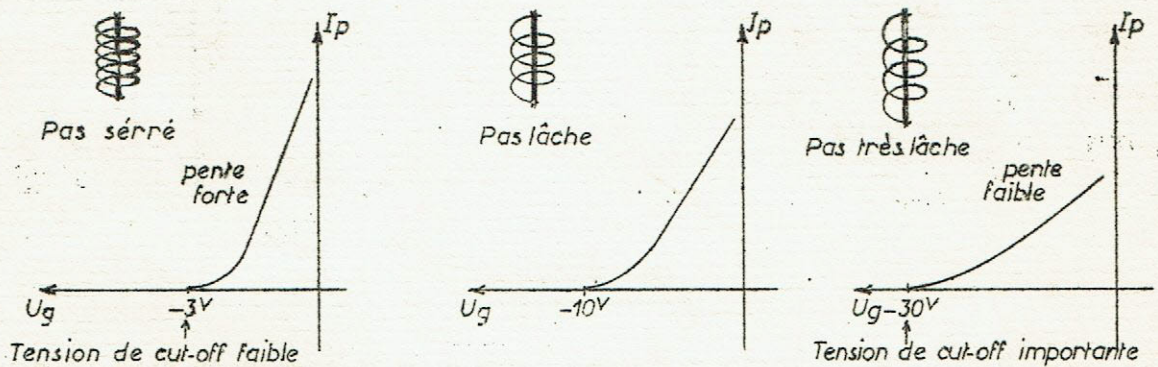
$$(P_A = P_B)$$

Au point A, la tension plaque est très faible. Les variations importantes du courant plaque et de la tension plaque permettent d'obtenir une amplification de puissance appréciable.

7°) Penthode à pente variable.

But : Permettre la réalisation d'étages amplificateurs à gain variable.

Principe : Le gain d'une penthode étant de la forme : $G = S.Z$, on pourra obtenir un gain variable si la pente est variable. Pour faire varier la pente, on joue sur le pas de la grille de commande, les courbes ci-dessous indiquant schématiquement les différences constatées entre les pentes de trois tubes en fonction du pas de leur grille.



Réalisation.

On construit un tube penthode comportant une grille de commande à pas variable, ce qui donnera une caractéristique $I_p - U_g$ dont la pente sera variable en fonction de la tension négative appliquée sur la grille.

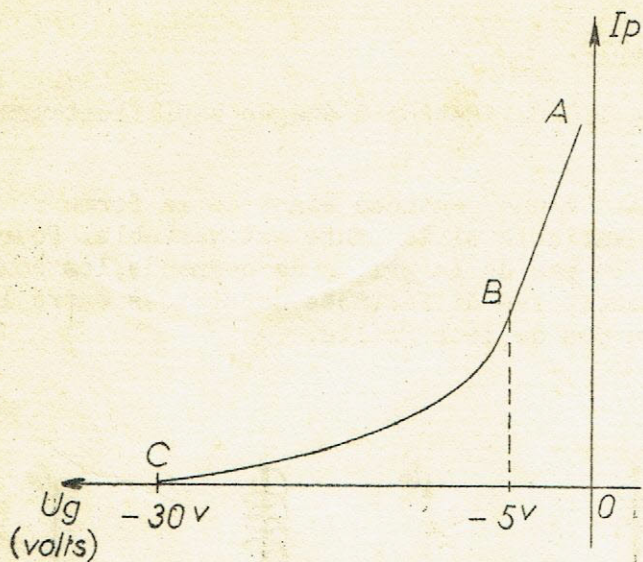
Pratiquement, toute dissymétrie entre la grille et la cathode entraîne un effet de pente variable.

Exemples :

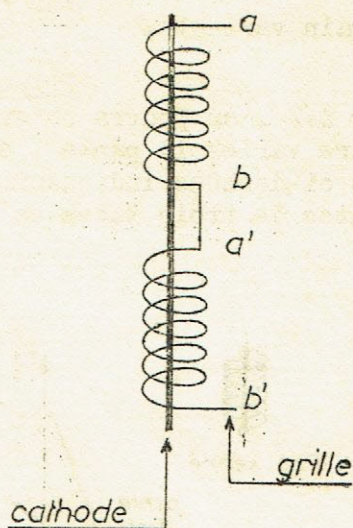
- 1. Grille à pas variable
- 2. Grille à pas constant comportant des coupures
- 3. Grille à pas constant, mais de diamètre variable etc....

Courbe caractéristique $I_p - U_g$.

La zone AB correspond à l'action des parties a b, a' b' de la grille. On constate que pour - 5 volts (environ), plus aucun électron ne franchit la grille. Toutefois, le courant plaque n'est pas nul, les électrons passant encore très facilement entre b et a'. Il faudra, par exemple atteindre - 30 volts pour que le courant plaque s'annule complètement (zone BC).



Courbe I_p-U_g d'un tube pentode à pente variable.



DOCUMENTATION

Les courbes caractéristiques, les valeurs indiquées dans ce cours ne constituent que des "ordres de grandeur". Pour plus de précision, l'élève doit se documenter, tant sur les tubes classiques que sur les tubes spéciaux. Des catalogues existent, édités par les constructeurs de tubes ou par des maisons d'éditions spécialisées. On choisira donc dans ces catalogues des exemples précis se rapportant aux différents tubes étudiés.

Ouvrage réservé
aux Elèves
de l'E. C. T. S. F. E.

Dépôt légal 3^e Trimestre 1960