

LUCIEN CHRETIEN

Ingénieur E.S.E.

Directeur des Etudes à l'E.C.T.S.F.E.

Rédacteur en chef de " T.S.F. et T.V. "

LES TUBES ÉLECTRONIQUES A GAZ

Tubes régulateurs. — Tubes à
cathode froide. — Phanotrons. —
Thyratrons et Ignitrons

Leur théorie et leurs utilisations

RETIRE DES COLLECTIONS
COMMUNALES

ÉDITIONS CHIRON, 40, rue de Seine, PARIS-6^e

LES TUBES ÉLECTRONIQUES A GAZ

I. — INTRODUCTION

Les ouvrages exposant les propriétés des tubes à vide sont extrêmement nombreux. On trouve tout aussi abondamment des ouvrages de haute technique que des ouvrages de vulgarisation. Mais il n'en est pas de même quand il s'agit des tubes à atmosphère ou à gaz.

Pourtant, nous assistons, en ce moment, à un prodigieux développement de ces nouveaux dispositifs électroniques. Les thyratrons et ignitrons, en particulier, remplacent dans beaucoup de cas, les machines tournantes et transforment complètement certains aspects de l'Electrotechnique. Chaque jour surgissent de nouvelles possibilités.

Les tubes à gaz permettent de faire fonctionner les moteurs de traction en courant alternatif, non seulement en leur conservant tous les avantages donnés par l'emploi du courant continu, mais en leur en ajoutant d'autres... Ils permettent aussi bien la transformation du courant alternatif en courant continu que la transformation inverse — Ils permettront peut être, un jour, de résoudre le problème du transport à distance de l'énergie électrique sous forme de courant continu à haute tension.

Ils fournissent d'excellentes solutions à tous les problèmes de régulation automatique, de contrôle à distance et de commandes asservies... Ils sont souples, silencieux, supportent sans dommage d'énormes surcharges et leur durée de vie utile devient comparable à celle des machines. Ils ont devant eux un avenir magnifique.

Nous avons donc pensé qu'une étude générale des tubes à atmosphère pourrait intéresser de nombreux techniciens. Notre intention est de limiter l'exposé aux considérations expérimentales sans entrer dans les détails théoriques, particulièrement discutables en ce domaine.

Notre étude sera suivie de quelques exemples d'application.

Nous publions, en annexe des chapitres correspondants, les caractéristiques des tubes électroniques à gaz les plus remarquables du marché commercial, de n'importe quelle origine.

CHAPITRE I

IONISATION

2. — Généralités.

Pour comprendre le fonctionnement d'un thyatron ou d'un ignitron, il faut analyser le mécanisme du passage de l'électricité à travers les gaz. Cette analyse n'est pas simple car la décharge peut prendre des aspects différents : effluves, décharge lumineuse, arc, étincelle, etc...

Il est, d'ailleurs, souvent difficile de préciser s'il s'agit d'un arc ou d'un autre type de décharge. Les facteurs qui modifient les caractères du phénomène sont extrêmement nombreux : nature et pression du gaz, nature, forme, distance des électrodes, température, nature et forme de l'enveloppe. Des traces infimes d'impuretés, une modification de surface inappréciable des électrodes suffisent pour produire des changements considérables. On s'explique ainsi pourquoi des physiciens ont parfois publié des renseignements discordants, parfois même contradictoires.

3. — Ionisation.

On peut facilement mettre en évidence le phénomène d'ionisation au moyen d'un dispositif dont nous donnons le schéma figure 1. Il comporte un tube à trois électrodes : cathode thermo-électronique, grille et plaque, dont l'ampoule contient le gaz à étudier sous faible pression (0,1 à 1 mm de mercure). La grille est portée à une tension positive réglable alors que l'anode est portée à une faible tension négative. Les polarités sont donc inverses de celles qu'on utilise ordinairement pour le fonctionnement des tubes triodes amplificateurs.

Pour de faibles valeurs de la tension positive de grille, on n'observe aucune intensité dans le circuit de plaque, mais brus-

quement, pour une certaine tension, un courant s'amorce, de sens inverse du courant anodique normal dans les tubes triodes. En même temps l'atmosphère interne s'illumine d'une lueur dont la couleur est caractéristique du gaz présent dans l'ampoule : rouge pour le néon, rose pour l'hélium, bleue pour la vapeur du mercure, jaune pour celle du sodium, etc...

On remarque facilement que la tension de grille qui provoque l'apparition du courant est indépendante de la pression dans une large mesure et ne dépend que la nature du gaz.

4. — Explication électronique.

Les électrons évaporés de la cathode sont accélérés par la tension positive de grille. Ils acquièrent ainsi une certaine vitesse et, en conséquence, une certaine énergie. Dans leur trajet entre cathode et grille, ils heurtent des molécules de gaz, ou passent

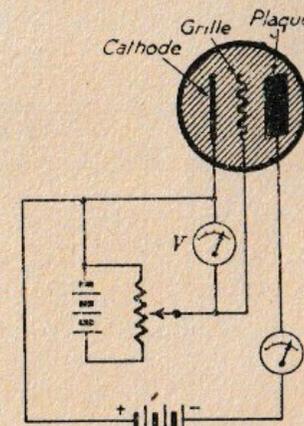


FIG. 1

assez près des atomes pour arracher des électrons périphériques. Un atome ayant perdu un électron cesse d'être électriquement neutre. On dit que c'est un ion positif. Il se dirige naturellement vers les électrodes négatives c'est-à-dire, ici, la plaque et provoque l'intensité de courant observée.

Il résulte de cela qu'un gaz ionisé devient conducteur. Les électrons libérés vont dans une direction, les ions positifs dans la direction opposée — mais les deux actions produisent une

intensité dans le même sens, puisqu'il s'agit de charges électriques de signe contraire.

5. — Tension et travail d'ionisation.

Pour extraire un électron d'un atome, il faut accomplir un certain travail : c'est le *travail d'ionisation*, ou travail d'extraction W_e .

En principe, l'électron projectile doit posséder une énergie cinétique $1/2 m V^2$ au moins égale au travail d'ionisation.

Pour communiquer une certaine vitesse à un électron, il faut lui faire subir une chute de potentiel V_e le travail accompli est alors $V_e \times e$ si e est la charge de l'électron.

V_e est appelé *potentiel minimum d'ionisation*.

Dans l'expérience de la figure 1, il faut appliquer à la grille une tension au moins égale à cette valeur pour provoquer le passage du courant. La triode à ionisation permet de mesurer ce potentiel minimum. Voici les valeurs obtenues pour quelques gaz ou vapeurs.

Nature	Potentiel minimum d'ionisation (volts)
Anhydride carbonique	14,5
Argon	15,4
Azote	14,5
Caesium	3,9
Eau (vapeur)	13,2
Helium	24,5
Hydrogène	13,5
Lithium	5,4
Mercure	10,4
Néon	21,5
Oxygène	13,56
Oxyde de Carbone	14,2
Potassium	4,32
Rubidium	4,16
Sodium	5,12

6. — Excitation et ionisation.

Une molécule est ionisée quand un électron, au moins, a été arraché de son orbite et a échappé à l'attraction du noyau. Mais, sans être libérés, les électrons peuvent être déplacés de leur trajectoire. La molécule est alors dans un *état excité*. Comme l'ionisation, un état d'excitation est désigné par le terme de : *transition*.

Une molécule donnée peut être l'objet d'un nombre déterminé de transitions dont chacune correspond à une dépense précise d'énergie. L'état d'excitation est *métastable*. Il faut entendre par là qu'il peut se maintenir pendant un certain temps. Après quoi peut se manifester spontanément le retour à l'état normal, ou, sous l'action d'une cause extérieure, le passage à un second état excité, correspondant à un niveau d'énergie plus élevé que le précédent.

L'état de *résonance* est un état excité particulier qui se produit généralement plus facilement que les autres.

De ces remarques découlent d'importantes conséquences :

a) A chaque état excité, correspond un certain niveau d'énergie. Cette énergie, exprimée en électron-volts est nommée : *potentiel d'excitation*. Ce potentiel a une signification physique facile à comprendre : c'est la chute de tension que doit subir un électron pour être capable, par son énergie cinétique, de provoquer l'état d'excitation.

b) Une molécule peut atteindre l'état d'ionisation, non pas directement, mais par étapes, en passant successivement par des états excités correspondant à des niveaux d'énergie de plus en plus élevés. Il en résulte la possibilité d'entretenir un gaz dans l'état ionisé bien que la différence de potentiel appliquée soit inférieure au potentiel minimum d'ionisation.

C'est ainsi que certaines décharges (arcs) peuvent être entretenues, d'une manière stable, dans la vapeur de mercure, avec une tension de 5 volts, alors que le potentiel minimum d'ionisation est supérieur à 10 volts. En fait, il suffit que la tension entre électrodes soit au moins égale au potentiel de première excitation du mercure, qui est de 4,7 volts. Ce processus d'ionisation se produit dans les gaz monoatomiques : gaz inertes comme le néon, l'hélium, etc..., et vapeurs métalliques.

7. — Oscillations du plasma.

On nomme « plasma » une région d'une décharge électrique dans laquelle on trouve autant de charges positives et négatives par unité de volume.

La présence d'oscillations du plasma permet d'expliquer également l'entretien de l'ionisation avec une tension moyenne appliquée inférieure au potentiel minimum d'ionisation.

Les électrons sont animés de mouvements oscillants à très haute fréquence et leur vitesse instantanée dépasse pendant une fraction de période celle qui correspond au seuil d'ionisation. Il est évident que ce phénomène correspond à des variations à haute fréquence de la chute de tension. La tension de pointe ainsi atteinte dépasse le potentiel minimum d'ionisation. Les ions produits pendant cette fraction du cycle suffisent pour entretenir la décharge.

Ce processus se produit très fréquemment dans les arcs à faible intensité. Il est très facile de mettre les oscillations en évidence au moyen d'un récepteur de radio placé au voisinage : le tube est une source violente de perturbations.

8. — Inversion du gradient de potentiel.

Nous avons reconnu que le gradient de potentiel, c'est-à-dire la variation de potentiel en fonction de la distance, présentait des variations considérables le long d'une décharge lumineuse. Il y a généralement une chute de tension importante, au voisinage même de la cathode et, en revanche, la variation est beaucoup plus faible dans d'autres régions. Quand la cathode est une source d'ions très intense, le gradient de potentiel peut s'inverser au voisinage de l'anode. Il en résulte nécessairement que la tension totale appliquée entre anode et cathode est inférieure à celle qui existe entre la cathode et certaines régions de la décharge. Or, c'est ce dernier potentiel qui détermine l'ionisation. Ce phénomène se produit fréquemment dans les gaz inertes et, en particulier, dans l'argon.

9. — Coexistence des différentes causes d'ionisation.

Les trois causes de production d'un état ionisé avec une tension appliquée inférieure au potentiel minimum d'ionisation peuvent exister dans un même tube.

Dans certains cas on peut passer graduellement d'un processus à l'autre quand on modifie le régime de fonctionnement : température, intensité, etc...

10. — Ionisation double, triple...

Quand l'agent ionisant possède une énergie suffisante, il peut arracher plusieurs électrons à la molécule. Le travail correspondant, est, par conséquent plus élevé.

Si un atome a perdu deux électrons, il se comporte naturellement comme une charge positive double de la charge élémentaire. Il en résulte que, placé dans un champ électrique, il est soumis à une accélération deux fois plus grande et, dans un espace donné, peut acquérir une vitesse plus élevée. Il peut alors produire certains effets mécaniques qui ne seraient pas à craindre avec des ions simples.

C'est ainsi, par exemple, qu'on peut utiliser une cathode à oxydes dans une atmosphère de vapeur de mercure tant que la chute de tension ne dépasse pas 20 volts. Au-dessous de cette tension la probabilité d'existence d'ions double est extrêmement faible. Mais il n'en est plus ainsi quand la chute de tension dépasse 22 volts. On constate alors une rapide destruction de la cathode par bombardement ionique. L'ionisation est totale quand le noyau a été dépouillé de tous ses électrons.

11. — Phénomènes lumineux.

Les phénomènes d'ionisation sont généralement accompagnés de manifestations lumineuses dont l'origine est facile à comprendre.

Un atome excité est instable. Il revient très rapidement à l'état stable en capturant les charges négatives nécessaires.

Mais pour ioniser l'atome il a fallu accomplir un certain travail. Le retour à l'état stable libère l'énergie dépensée pour l'arrachement des électrons. Celle-ci apparaît sous forme de rayonnement : lumière visible ou invisible (ultra-violet).

Les relations entre la fréquence du rayonnement et l'énergie dépensée sont régies par la théorie des quanta :

$$W_e = h \times \nu$$

W_e = travail d'ionisation ;

h = constante de Planck ; ($6,55 \times 10^{-27}$ c.g.s.)

ν = fréquence en c/s ;

ou, en partant du potentiel d'ionisation :

$$e \times V_e = h \times \nu$$

e = charge de l'électron ;

V_e = tension d'ionisation.

Mais la lumière produite par un gaz ionisé n'est pas monochromatique. Elle est constituée par un spectre de raies, parfois d'une très grande complexité.

Parmi les fréquences caractéristiques on distingue celle d'ionisation qui permet de calculer les relations précédentes. Les autres raies s'expliquent par la présence des états excités. L'atome ionisé ne revient pas toujours directement à l'état stable. Il passe successivement par des niveaux d'énergie correspondant à des états excités intermédiaires entre l'ionisation et la stabilité. Chaque transition correspond à l'émission d'une raie caractéristique dont la fréquence peut être calculée au moyen des relations ci-dessus. Le nombre de combinaisons peut être considérable dans certains cas, mais il n'est jamais infiniment grand. En conséquence, il s'agit toujours d'un spectre de raies.

La formule montre que la fréquence est d'autant plus élevée que les tensions mises en jeu sont plus grandes. Ainsi la vapeur de mercure émet des raies dans le domaine de l'ultra-violet.

Notons en passant que les rayons X sont produits par un mécanisme analogue, mais au moyen de tensions plus élevées.

12. — Agents ionisants.

L'ionisation peut être produite par le choc d'une particule chargée quelconque, à condition qu'elle possède une énergie suffisante : électrons, ions positifs, ou négatifs. Un atome excité est capable également de produire l'ionisation d'autres atomes.

Il est probable qu'il ne s'agit pas d'un choc purement mécanique comme celui d'un projectile sur une cible. Il n'est sans doute pas nécessaire que la particule ionisante traverse l'atome. Il suffit qu'elle passe au voisinage immédiat pour provoquer, par action à distance, des perturbations laissant l'atome dans l'état excité.

L'ionisation peut aussi être produite par des radiations électromagnétiques possédant un quantum assez élevé, c'est-à-dire d'assez courte longueur d'onde. Ainsi les rayons ultra-violet, les rayons X et, plus encore, les rayons gamma sont des agents ionisants. Il s'agit du même phénomène que dans l'effet photo-

électrique. L'énergie possédée par le photon peut être transmise à un électron. Celui-ci acquiert ainsi assez d'énergie pour vaincre la force attractive du noyau et se libérer.

Les températures élevées favorisent ou même, provoquent l'ionisation. L'énergie des particules est telle que les électrons peuvent se libérer spontanément. C'est pour cette raison que la matière intérieure des étoiles, dont la température peut s'évaluer en millions de degrés, est constituée par des noyaux dépouillés de la totalité de leur cortège électronique.

13. — Action des différents facteurs.

Ce serait une erreur de croire qu'on provoque l'ionisation d'un gaz en y plongeant deux électrodes entre lesquelles est appliquée une tension supérieure à la tension minimum d'ionisation. Ce serait confondre *tension d'amorçage* et *tension d'ionisation*. Ce serait oublier que le potentiel d'ionisation doit, en réalité, s'exprimer non pas en volts, mais en *électron-volt* qui est une unité de *travail*.

Pour qu'un électron puisse ioniser un atome, il faut qu'il puisse acquérir l'énergie d'ionisation. La chute de potentiel que représente la tension d'ionisations y pourvoirait si le phénomène se passait dans le vide absolu, ou dans une atmosphère assez raréfiée.

Mais, dans un gaz, l'électron heurte des molécules. Il n'est soumis à l'accélération du champ qu'entre deux chocs successifs. Si les molécules sont nombreuses, c'est-à-dire si la pression est assez élevée, l'électron ne peut pas acquérir une énergie suffisante entre deux collisions. On voit ainsi intervenir l'influence du *libre parcours moyen*, c'est-à-dire de la pression et de la nature du gaz.

Si l'atmosphère est très raréfiée, l'électron peut acquérir l'énergie suffisante — mais les probabilités de rencontre avec une molécule diminuent.

Ces deux actions contraires expliquent l'existence d'une pression optimum.

Des électrons à très grande énergie ne sont pas nécessairement les plus ionisants. En effet, nous avons déjà signalé que l'ionisation ne résultait pas du choc direct entre projectile et électron planétaire. Il s'agit d'une action électrique qui peut s'exercer à une certaine distance : les probabilités de rencontre entre deux électrons sont infimes.

Pour que l'action à distance puisse être efficace il faut qu'elle s'exerce pendant un certain temps. Or, ce temps est d'autant plus bref que le projectile est plus rapide. Il y a donc encore nécessairement une gamme de vitesse favorable.

14. — Etude directe de l'ionisation.

Nous avons indiqué plus haut qu'on pouvait facilement mettre en évidence le phénomène d'ionisation avec la triode à gaz. On peut se proposer d'employer une méthode plus directe.

Dans le gaz à étudier, on place deux électrodes entre lesquelles on applique une différence de potentiel et on mesure l'intensité du courant.

Si le gaz était soustrait à toutes les influences ionisantes : rayons ultra-violet, X ou gamma, proximité de corps radioactifs, rayons cosmiques, etc... il se comporterait comme un isolant parfait. Mais il y a toujours quelques ions présents dans le gaz et avec des moyens appropriés, on peut toujours déceler un très faible courant.

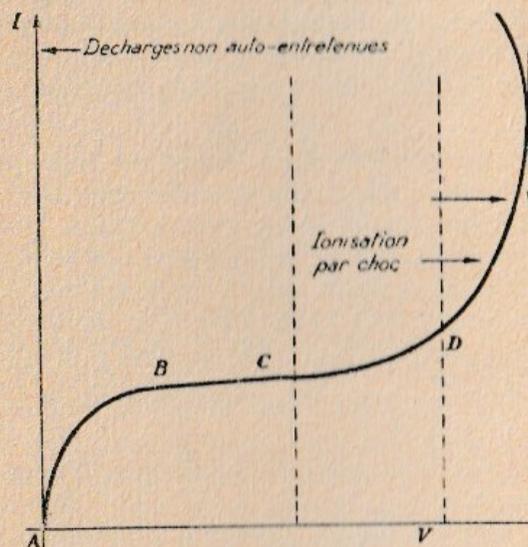


FIG. 2

Pour que ce courant soit plus facile à mesurer il faut faire agir un agent ionisant entre les deux électrodes. On peut y placer, par exemple, un corps radioactif, on peut éclairer la cathode

avec des rayons ultra-violet. Dans ce dernier cas les électrons photo-électriques sont accélérés par le champ entre les deux électrodes.

La courbe qui donne l'intensité en fonction de la tension est la branche ABC de la figure 2. A partir du point B, on atteint la saturation, c'est-à-dire que tous les électrons libérés par ionisation sont captés par l'anode. Le courant de saturation obtenu dans ces conditions est encore extrêmement faible, même avec de puissantes sources d'ionisation. Ce n'est qu'exceptionnellement qu'il atteint 10^{-6} ampère (1 microampère).

Si l'on continue d'augmenter la tension, on observe une nouvelle montée CD de la courbe. C'est la zone d'ionisation par choc. On appelle encore parfois ce phénomène *décharge ou avalanche de Townsend*.

Les électrons libérés acquièrent assez d'énergie entre deux chocs successifs pour devenir ionisants à leur tour. Et il en est de même de chaque électron d'ionisation. Ainsi, le nombre d'électrons croît exponentiellement en fonction de la distance à l'origine.

Il est à noter que, dans cette région, la décharge n'est pas *auto-entretenuée*. Le courant cesse dès que l'on supprime l'agent ionisant.

C'est le phénomène qui est utilisé dans les tubes photoélectriques à atmosphère gazeuse et, sous une autre forme, dans les compteurs de Geiger.

Si l'on continue d'augmenter la tension au delà du point D, l'intensité croît encore plus rapidement que ne semble l'indiquer le mécanisme des avalanches.

En cette région, les ions acquièrent assez d'énergie soit pour devenir ionisants à leur tour, soit pour libérer des électrons sur la cathode par émission secondaire. C'est une *décharge de Townsend de second ordre*.

C'est dans cette région que la décharge peut être auto-entretenuée — la tangente à la courbe devient alors verticale — et la suppression de la cause ionisante ne fait point cesser la décharge. A pression assez élevée, l'augmentation de tension peut également donner lieu à une étincelle.

15. — Désionisation.

L'atome ionisé ou simplement excité est dans un état métastable. Il revient à l'état stable en capturant un électron. Toutefois il peut demeurer un temps plus ou moins long à l'état ionisé.

Le mécanisme du retour à l'état stable n'est pas entièrement élucidé. Il ne semble pas que l'atome revienne directement à l'état normal. En effet, dans un milieu où les électrons sont animés de vitesses beaucoup plus grandes que celles des ions, il semble que les probabilités de capture soient extrêmement faibles.

On peut supposer que les électrons se fixent provisoirement sur des atomes neutres pour former de gros ions négatifs, et que ceux-ci, animés d'une vitesse faible, se combinent ensuite avec les ions positifs.

Le retour à l'équilibre se fait aussi vraisemblablement sur les électrodes ou sur les parois.

On peut constater expérimentalement que la vitesse de désionisation varie avec la nature du gaz, la température et l'intensité du champ électrique.

CHAPITRE II

DÉCHARGE DANS LES GAZ

16. — Etincelle.

Appliquons une différence de potentiel croissante entre deux électrodes placées dans l'air, à la pression atmosphérique normale. A partir d'une certaine tension, on voit apparaître une lueur violacée entre les électrodes (effluves). En même temps se répand une odeur caractéristique d'ozone (oxygène triatomique). On peut percevoir un crépitement particulier, un bruit de souffle.

Il y a effectivement déplacement d'air (vent électrique). Ces phénomènes (effet corona) s'accompagnent du passage d'une certaine intensité de courant (de quelques microampères jusqu'à quelques milliampères). Ils sont dus à l'ionisation des molécules entre les deux électrodes.

Pour une tension encore plus élevée, dite *tension explosive* ou *potentiel disruptif* se produit l'*étincelle électrique* sous forme d'un trait brillant, accompagné d'un claquement sec, qui peut devenir une détonation pour des distances explosives élevées. L'étincelle est droite pour des distances explosives ne dépassant pas 10 à 15 millimètres. Pour des distances plus grandes c'est un parcours plus ou moins compliqué. Des recherches récentes ont montré que l'étincelle est précédée par une effluve qui semble en jalonner le tracé. Parfois, plusieurs tracés différents sont « essayés » avant le parcours définitif.

L'étincelle est constituée par une trajectoire très dense d'ions gazeux et de particules arrachées aux électrodes. Sa résistance électrique équivalente est très faible : elle peut n'être que de quelques dizaines d'ohms.

Généralement, la source de haute tension présente une résistance intérieure très élevée et ne peut — par conséquent — fournir qu'une très faible intensité.

Il en résulte que l'étincelle, équivaut à un court-circuit. La tension entre les électrodes tombe instantanément à une très faible valeur et le phénomène cesse.

Il se produit de nouveau quand la source a pu ramener la tension entre électrodes à la valeur explosive.

L'étincelle est, par ce mécanisme, un phénomène discontinu dont la fréquence est fonction du potentiel disruptif et de l'intensité que peut fournir la source.

La distance explosive dépend principalement de la tension appliquée et de la pression, mais aussi de la forme de la nature des électrodes.

18. — Influence de la pression.

On peut étudier l'influence de la pression au moyen du dispositif de la figure 3. Il s'agit d'un tube de verre dans lequel on peut faire un vide plus ou moins complet. On peut aussi, de cette manière, étudier l'influence de la nature du gaz.

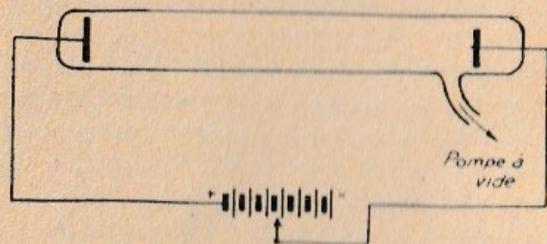


FIG. 3

La tension explosive diminue d'abord, en même temps que la pression. Elle passe par un minimum pour une pression généralement comprise entre 0,5 et 0,1 millimètre de mercure. Après quoi, elle croît très rapidement pour devenir plus grande qu'à la pression normale. Aux pressions qu'on réalise couramment en électronique (10^{-6} à 10^{-7} mm de mercure) elle est très supérieure à la distance dans l'air, à la pression atmosphérique normale.

On peut, pour un gaz donné et pour une disposition donnée des électrodes, tracer une courbe des variations de la tension disruptive en fonction de la pression. On obtient alors une courbe dont l'allure est indiquée figure 4.

Il faut noter que dès que la pression s'abaisse à quelques centimètres de mercure, les caractères de la décharge changent remarquablement. L'étincelle n'est plus un trait net, elle s'épaissit.

Bientôt le phénomène n'a plus le caractère explosif. Il ne s'agit plus d'une « disruption ». C'est pour cette raison qu'on remplace le terme « potentiel explosif » par potentiel ou tension d'amorçage.

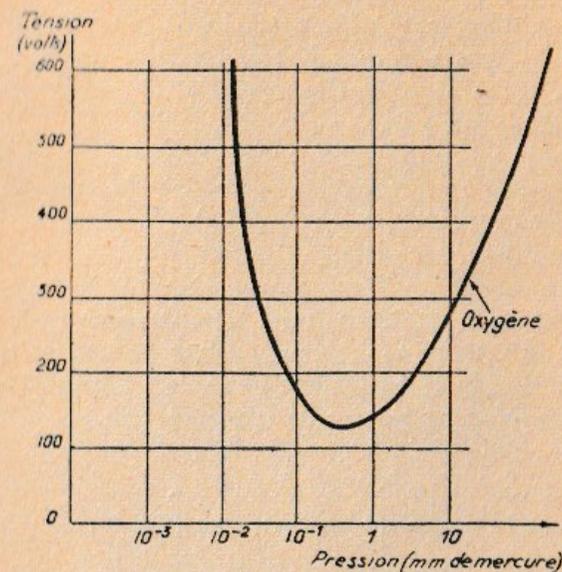


FIG. 4

La présence d'impuretés dans le gaz soumis à l'expérience change complètement l'allure de la courbe même si ces impuretés sont à l'état de traces indosables. Il suffit également d'un changement infime de la structure superficielle des électrodes.

19. — Loi de Paschen.

On obtiendrait une courbe de même allure que celle de la figure 4 en prenant la distance entre électrodes comme variable.

C'est précisément ce que fait ressortir la loi de Paschen : la distance explosive est une fonction du produit $p \times d$, de la pression p , par la distance d entre les électrodes. Cette fonction revêt généralement l'allure hyperbolique indiquée sur la figure 4.

Toutefois, cette loi ne s'applique qu'aux gaz ou vapeurs purs. Il est impossible de prévoir avec exactitude les résultats quand il s'agit de mélanges gazeux.

La tension d'amorçage est généralement faible dans les gaz inertes : helium, neon, argon, krypton, etc...

20. — Tension d'amorçage et de désamorçage.

Nous avons déjà noté plus haut qu'il ne faut surtout pas confondre la *tension d'amorçage* avec la *tension minimum d'ionisation*.

La tension d'amorçage est fonction de la nature du gaz mais aussi de la pression, distance des électrodes, disposition géométrique, etc., etc., alors que le potentiel d'ionisation ne dépend que de la nature du gaz.

D'ailleurs le potentiel d'ionisation est pratiquement toujours inférieur à 50 volts, alors que le potentiel d'amorçage est pratiquement toujours supérieur à 100 volts et peut être de plusieurs dizaines de milliers de volts.

Quand la décharge lumineuse a été amorcée on peut réduire le potentiel appliqué *sans qu'elle cesse de se produire*. Par exemple, la tension d'amorçage étant de 250 volts, on constate que la décharge se maintient pour 240, 230, 225 volts. Mais elle cesse brusquement pour une certaine tension, dite de *désamorçage* ou *d'extinction*.

21. — Aspect de la décharge lumineuse (fig. 5).

L'aspect de la décharge varie notablement avec la pression, la distance des électrodes, leur forme, leur nature, la nature et la forme de l'enveloppe. Pour des pressions comprises entre quelques dixièmes et quelques centimètres de millimètres de mercure et des distances supérieures à un centimètre, on peut y distinguer des zones assez bien caractérisées.

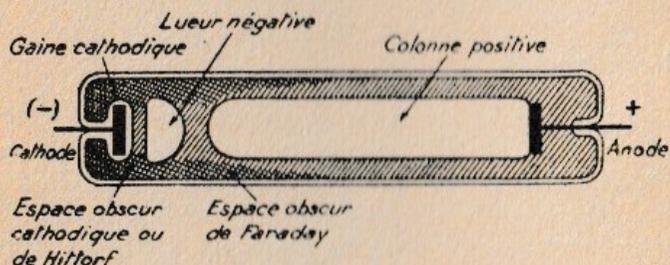


FIG. 5

On observe que la cathode est entourée d'une gaine mince et assez brillante : c'est la *gaine cathodique*. Au delà, et séparée par l'*espace obscur de Hittorf*, on trouve la *lueur négative*, parfois

difficile à observer. La partie la plus brillante est la *colonne ou lueur positive*, séparée de la *lueur négative* par l'*espace obscur de Faraday*.

Un allongement du tube, ou un déplacement de l'anode entraîne une modification de longueur de la colonne positive, sans rien changer pour les autres parties de la décharge.

Une diminution d'intensité a pour effet de modifier la surface de la gaine cathodique. A la limite d'amorçage, on observe que cette gaine se réduit à une tache lumineuse de faible surface sur la cathode. La surface s'accroît progressivement avec l'intensité jusqu'au recouvrement complet de l'électrode, y compris la connexion d'amenée du courant.

22. — Répartition des tensions dans le tube.

A l'aide de fils fins placés dans la décharge et de dispositifs électrométriques, on peut mesurer la tension en chaque point. On observe alors que la répartition est, par exemple, celle que nous donnons figure 6.

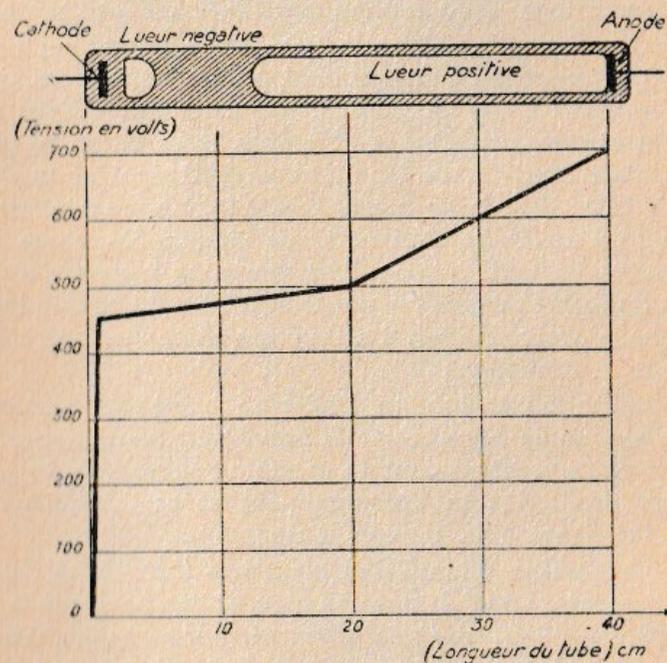


FIG. 6

Le fait essentiel, c'est que la presque totalité de la différence de potentiel apparaît au voisinage de la cathode — la variation de potentiel est beaucoup plus faible dans la lueur négative et dans l'espace obscur de Faraday — Elle varie linéairement ensuite dans la colonne positive.

23. — Mécanisme d'amorçage et d'entretien de la décharge.

Dans une atmosphère quelconque il y a toujours quelques ions présents, produits par les rayons cosmiques, ou par la radio-activité de certains éléments. Il en résulte le passage d'un courant de très faible intensité, quand on applique une tension. Cette intensité est trop petite pour être facilement mesurable (inférieure à 10^{-18} ampères, c'est-à-dire à la milliardième partie d'un milliardième d'ampère).

Sous l'influence du champ, ces ions se mettent en mouvement. Ils viennent frapper la cathode. Ces chocs libèrent des électrons c'est le phénomène d'émission secondaire. Ces électrons se déplaçant vers l'anode peuvent, à leur tour produire des ions.

Le processus se poursuit ainsi et se traduit par la production de nouveaux ions, si la tension appliquée est suffisante.

Ainsi se constitue dans le tube un « plasma » c'est-à-dire un milieu comportant pratiquement autant de charges positives que d'électrons. Dans un plasma, par suite des actions antagonistes des charges positives et négatives, la variation de potentiel est très faible. Toute la tension se trouve ainsi reportée au voisinage même de la cathode (voir courbe figure 6). Le gradient de potentiel (dv/dl) c'est-à-dire l'intensité de champ électrique devient considérable en cette région. Les électrons peuvent alors être extraits du métal cathodique par le seul effet du champ (émission par cathode froide). C'est l'action ionisante des électrons qui entretient la décharge.

Si l'on réduit la tension l'effet se manifeste surtout dans l'espace obscur de Faraday et la lueur positive. Le gradient de potentiel reste pratiquement le même au niveau de la cathode. Dans ces conditions la décharge peut se maintenir pour une tension inférieure à la tension d'amorçage.

Le phénomène d'ionisation n'est pas instantané, en conséquence l'amorçage ne l'est pas non plus. Si l'on applique la tension d'amorçage pendant une microseconde, par exemple, rien ne se produit. Le phénomène se produit au bout d'un temps d'autant plus bref que la tension appliquée est plus élevée.

24. — Caractéristique intensité-tension.

C'est l'étude de cette caractéristique qui permet de comprendre le comportement des tubes à cathode froide. C'est elle également qui conduit à distinguer plusieurs catégories de décharges électriques dans un gaz.

On obtient naturellement des courbes différentes pour chaque variation d'un élément quelconque : distance, surface, nature, texture des électrodes, pression, température, nature

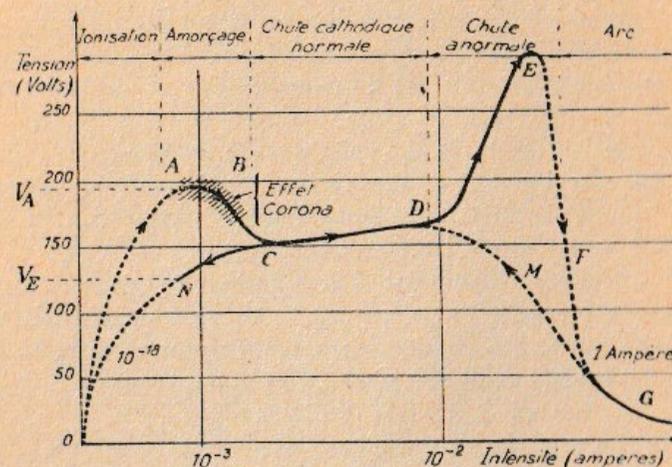


FIG. 7

de l'atmosphère, etc... Toutefois on peut toujours distinguer des caractères communs dans les résultats obtenus. Il faut donc bien souligner que le diagramme de la figure 7 n'est valable que pour un cas bien précis et qu'un facteur, en apparence insignifiant, peut amener une modification profonde de la courbe.

Nous n'avons point marqué d'échelle des intensités, car il ne s'agit point d'une variation linéaire ni même exponentielle. Nous avons simplement indiqué quelques repères, situant des ordres de grandeur.

En partant d'une tension nulle on obtient la branche OA, figurée en pointillé parce qu'elle correspond à des intensités trop faibles pour être facilement mesurables : de l'ordre de 10^{-24} à 10^{-12} ampère.

En A se produit l'amorçage. La tension baisse dans la branche BC, correspondant à l'établissement normal de la décharge. En réalité le fonctionnement stable ne commence qu'en C. On

voit alors les différentes parties de la décharge, décrites plus haut. La gaine cathodique est réduite à un point sur la cathode.

De *C* en *D* la variation de tension est extrêmement faible. C'est la région de *chute cathodique normale*. A mesure que l'intensité s'accroît, on voit la gaine cathodique recouvrir progressivement la surface entière de la cathode. La faible augmentation de tension qui se manifeste de *C* en *D* n'est pas due à une variation de chute cathodique — qui est constante — mais à une variation dans les autres parties de la décharge.

La longueur de la branche *CD* est d'autant plus grande que la surface de la cathode est plus importante. La densité de courant dans la gaine cathodique est constante pour la chute cathodique normale.

A partir du point *D*, la cathode est entièrement recouverte par la gaine cathodique. On observe alors une augmentation de tension entre les extrémités du tube, c'est la branche *DE* qui correspond à la *chute cathodique anormale*.

La puissance électrique fournie par la source augmente notablement et cette puissance apparaît nécessairement dans la gaine cathodique. En conséquence la cathode s'échauffe de plus en plus. La région comprise entre *C* et *E* correspond à des intensités de l'ordre de 1 à 100 milliampères.

En *E*, se produit un nouveau changement de régime. Chaque *augmentation* d'intensité correspond à une *diminution* de tension. De plus, l'intensité peut prendre des valeurs considérables : plusieurs ampères, par exemple. Il faut également signaler ce fait remarquable que la tension peut devenir *inférieure* à la tension minimum d'ionisation. C'est la région de décharge par *arc électrique*. Les différentes régions de la décharge ont alors généralement disparu.

La courbe de la figure 7 n'est pas réversible. C'est ainsi, par exemple, qu'en réduisant l'intensité, on suivrait la trajectoire *GMD*. Encore faudrait-il faire intervenir la vitesse de variation du courant.

De même, pour les faibles intensités, la branche suivie, serait, par exemple *CN*, jusqu'à la tension d'extinction V_e .

25. — Chute cathodique normale.

Nous avons reconnu que la chute cathodique demeure *normale* tant que la gaine cathodique ne recouvre qu'une partie de la cathode. Cette grandeur dépend de la nature de la cathode

et de celle du gaz. Pour les gaz inertes elle est indépendante de la pression mais, pour les autres il n'en est pas ainsi et elle varie suivant des lois plus ou moins compliquées.

Les métaux à faible potentiel de sortie sont aussi ceux qui fournissent la plus faible chute de tension. Mais il suffit d'une très faible modification de surface pour apporter des changements notables : trace d'oxydes, adsorption d'un gaz, etc... C'est pour cette raison que les caractéristiques des tubes à cathode froide ne sont jamais stables. Si un tube a fonctionné en régime de surcharge l'échauffement de la cathode ou le bombardement accidentel ionique auquel elle a été soumise peuvent apporter de profondes modifications dans son comportement. Au cours d'un fonctionnement prolongé, on peut observer une variation des caractéristiques due à la production d'une combinaison superficielle (hydrure, dans le cas de l'hydrogène, nitrure dans le cas de l'azote, carbure, dans le cas d'un composé du carbone, etc...).

26. — Définition de l'arc.

L'*arc électrique* est un type de décharge qu'il ne faut pas confondre avec la décharge luminescente, mais il faut bien préciser que la distinction n'est pas toujours très facile.

La chute de tension dans l'arc est toujours très faible, elle peut être inférieure à la tension d'ionisation. De plus, la caractéristique intensité/tension est horizontale ou même descendante. *Il en résulte que la résistance électrique est négative.*

L'annulation de la chute de tension cathodique est due à la présence d'une zone à forte densité d'ionisation au voisinage même de la cathode. Ce résultat ne peut être obtenu que par une émission électronique intense de la cathode. Cette production d'électrons peut être due à un effet de champ (émission par cathode froide) ou elle peut être d'origine thermo-électronique. En effet, un arc s'amorce spontanément et d'une manière immédiate, quand la cathode est une source d'électrons comme un filament incandescent.

Pour qu'il s'amorce à partir d'une cathode froide, il faut provoquer l'échauffement de celle-ci, par une chute cathodique anormale ou par tout autre moyen.

CHAPITRE III

LES TUBES A CATHODE FROIDE

a) TUBES A DÉCHARGE LUMINESCENTE

27. — Généralités.

Les applications des tubes à cathode froide sont basées sur les particularités de la caractéristique intensité/tension dont la forme générale est indiquée figure 7.

C'est généralement en considérant ce graphique qu'on peut comprendre les anomalies de fonctionnement qui peuvent se présenter ou les accidents que peut entraîner la surcharge.

28. — Tubes régulateurs.

On utilise la remarque que la chute cathodique normale est constante tant que la surface de la cathode n'est pas entièrement recouverte par la gaine.

Ainsi, la caractéristique est un palier d'autant plus étendu que la surface de la cathode est plus grande.

La faible variation de tension est due au fait qu'il est impossible d'utiliser exclusivement la chute cathodique : il y a nécessairement une variation de tension dans les autres régions de la décharge. Par construction on s'efforce de rendre cette dernière aussi faible que possible. Ainsi, par exemple, la tension sera maintenue constante à ± 1 volt près quand l'intensité de courant variera de 5 à 40 milliampères.

Le courant minimum de 5 milliampères correspond à l'établissement normal de la décharge. Par contre au delà de 40 milliampères il s'agirait de la chute cathodique anormale et il en résulterait une modification définitive des propriétés du tube.

La tension d'amorçage (zone AB de la figure 7) est supérieure d'une dizaine de volts à la tension de régulation.

Nous donnons figure 8 une caractéristique de régulation relevée sur un tube commercial, prévu pour fournir une tension stabilisée de 105 volts. On voit que la tension est constante à

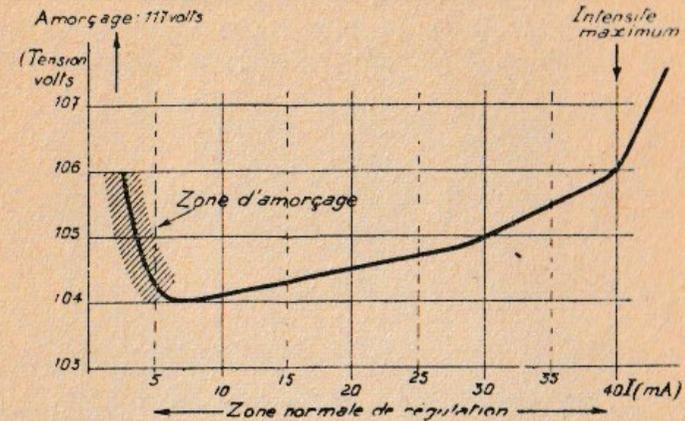


FIG. 8

1 volt près, si la variation d'intensité est comprise entre 5 et 30 milliampères. Elle est constante à 2 volts près si l'intensité est poussée jusqu'à 40 milliampères.

29. — Utilisation pratique.

Ces tubes régulateurs permettent d'obtenir une tension pratiquement constante en dépit des variations de l'alimentation ou des variations de charge.

Le montage est indiqué figure 9. Il faut disposer d'une tension d'entrée V_E supérieure à la tension à stabiliser V_S . Cette tension doit naturellement être plus grande que la tension d'amorçage du tube régulateur.

La régulation est d'autant meilleure que la résistance série R_s est plus élevée, c'est-à-dire que la tension d'entrée est plus différente de la tension dont on a besoin. Il importe de bien comprendre la fonction de R_s . Toute variation de tension d'entrée ΔV_E a pour conséquence une variation importante d'intensité ΔI_r dans le tube régulateur. Il en résulte une correction de tension $R_s \times \Delta I_r$ d'autant plus grande pour une valeur donnée de ΔI_r que R_s est elle-même plus grande.

Le système compense également les variations de tension qui pourraient résulter d'une variation d'intensité ΔI_c dans la

charge R_c . Il va sans dire que la variation maximum ΔI_{cm} est déterminée par les caractéristiques du tube régulateur.

Quand I_c est maximum, il faut que le tube régulateur soit traversé par l'intensité minimum compatible avec un fonctionnement stable. Ce serait 5 milliampères pour le tube dont la courbe est donnée figure 8. Une valeur inférieure correspondrait au

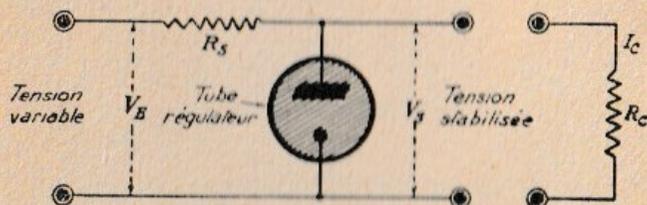


FIG. 9

désamorçage du tube régulateur. Ce serait naturellement la suppression de toute régulation. Il est à noter que le désamorçage s'accompagne souvent de la production d'oscillations par un mécanisme qui sera étudié plus loin.

Au contraire, quand I_c prend la valeur minimum, il faut que l'intensité dans le tube régulateur ne dépasse pas les limites indiquées par le constructeur ; soit 40 mA dans l'exemple déjà cité. Une surcharge importante du tube pourrait entraîner sa mise hors service définitive.

Une surcharge modérée peut amener une modification des caractéristiques de régulation.

30. — Tubes en parallèle.

Lorsque (Fig. 10) les variations de courant à compenser dépassent les possibilités d'un tube, on peut en placer plusieurs en parallèle. Toutefois il ne faut pas oublier qu'un tube à gaz constitue un élément à résistance interne faible et mal définie.

Il est donc à craindre que l'intensité ne se répartisse pas également dans les différents tubes mis en parallèle. Il faut alors prévoir des résistances d'équilibre. Il est évident que ces résistances — mesurant de 75 à 100 ohms — nuisent à l'effet régulateur.

31. — Tubes en série.

Par contre, on peut, sans précaution spéciale, mettre plusieurs tubes en série pour obtenir une tension stabilisée plus grande

(Fig. 11). Il va sans dire qu'il faut choisir des tubes semblables, tout au moins en ce qui concerne les limites d'intensité.

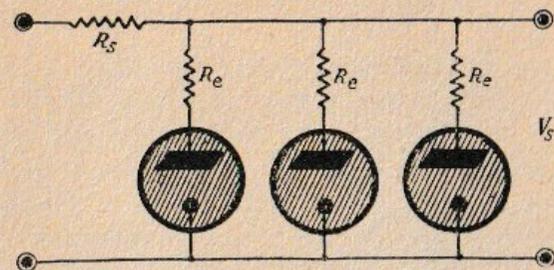


FIG. 10

Si ces valeurs sont identiques, on peut sans inconvénient monter en série deux tubes ayant des tensions de régime différentes. Ainsi pour obtenir une tension stabilisée de 250 volts, on pourra choisir un tube fournissant 150 volts et un tube fournissant 100 volts ; les limites extrêmes d'intensité étant, par exemple, pour les deux tubes 5 et 40 mA.

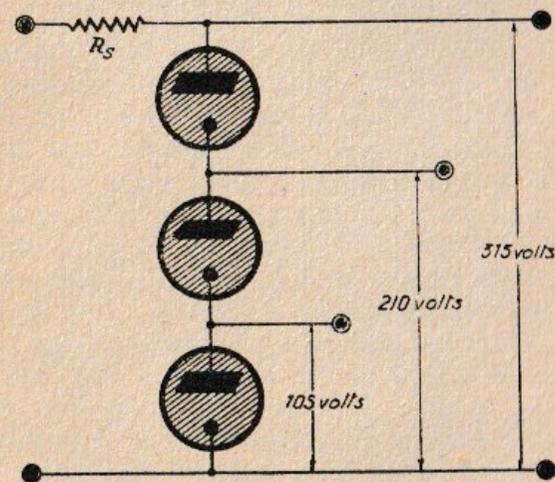


FIG. 21

Les tubes montés en série constituent des diviseurs de tension qu'on peut employer exactement comme un ensemble de résistances potentiométriques.

32. — Tension de référence pour alimentation stabilisée.

Un autre emploi usuel des tubes régulateurs, c'est la création d'une tension de référence pour un dispositif fournissant une tension stabilisée.

Le principe est indiqué par la figure 12.

La cathode du tube L_1 est maintenue à une tension invariable, déterminée par le tube régulateur R . Sa tension de grille est fixée par le potentiomètre R_1R_2 .

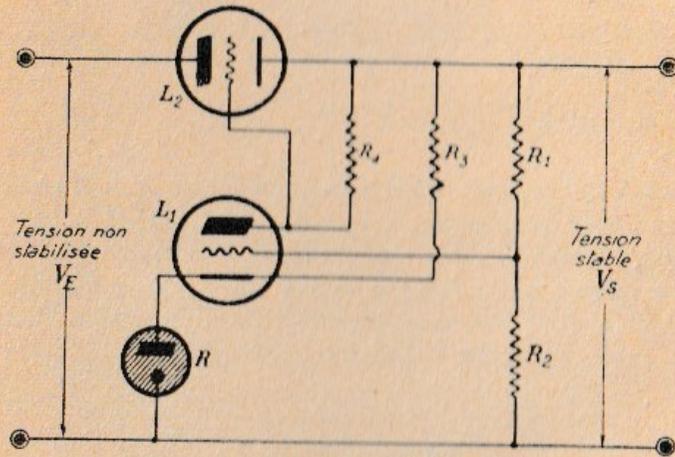


Fig. 12

S'il y a une modification de la tension de sortie V_s , il se produit une variation de la tension de grille de L_1 . Il y a, en conséquence, une variation de tension beaucoup plus importante entre les extrémités de R_4 . L'amplification de la variation peut atteindre plusieurs centaines si L_1 est un tube penthode.

Cette variation est appliquée entre grille et cathode du tube L_2 qui agit ainsi comme une résistance variable. Il est facile de voir que cette action tend à corriger la variation de tension initiale.

Un tel dispositif permet d'obtenir des tensions stables à moins de 0,1 % près pour des variations d'intensité de plusieurs centaines de milliampères, ou, de la même manière, pour des variations du secteur atteignant, par exemple 10 %.

En pratique le tube L_1 sera un tube penthode à pente fixe (6SJ7, par exemple) utilisé avec une charge de 1 à 2 megohms. L_2 doit pouvoir fournir l'intensité maximum dont on a besoin. On emploie couramment un tube de sortie monté en triode (6L6

par exemple). Si c'est nécessaire, on utilise plusieurs tubes en parallèle.

33. — Production d'oscillations.

L'existence d'une tension d'amorçage et d'une tension d'extinction peut être mise à profit pour obtenir des oscillations de relaxation.

Considérons le montage de la figure 13. Une source V dont la tension dépasse la tension d'amorçage, charge le condensateur C , à travers une résistance R . Une lampe à cathode froide est branchée en parallèle avec le condensateur.

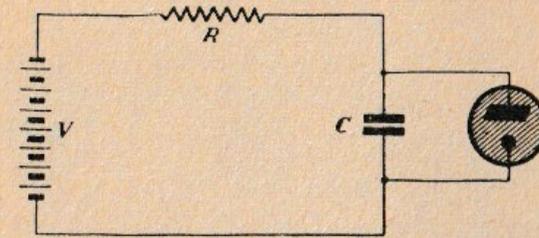


Fig. 13

Le condensateur se charge à travers la résistance. La tension croît selon la courbe exponentielle (Fig. 14) OPA . Mais, au point A , la tension d'amorçage étant atteinte, le tube s'allume. La résistance devient extrêmement faible. Le condensateur se décharge suivant la courbe AE . En E , la tension d'extinction étant atteinte, la décharge cesse de se produire et la résistance interne du tube

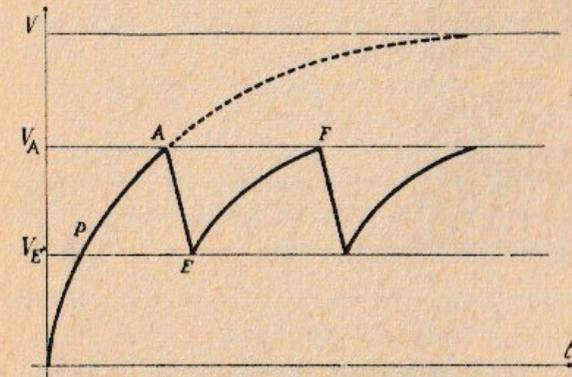


Fig. 14

devient pratiquement infiniment grande. Le condensateur peut alors se charger de nouveau... Ainsi la tension oscille entre la tension d'amorçage et celle d'extinction.

La fréquence est une fonction de la constante de temps CR , des valeurs V , V_A et V_E et des caractéristiques du tube. On peut très facilement synchroniser les oscillations avec un phénomène périodique.

34. — Redresseurs de courant à cathode froide (fig. 15).

Considérons un tube comportant une électrode de grande surface A et une électrode filiforme, et par conséquent de faible surface B . Appliquons une différence de potentiel alternative



FIG. 15

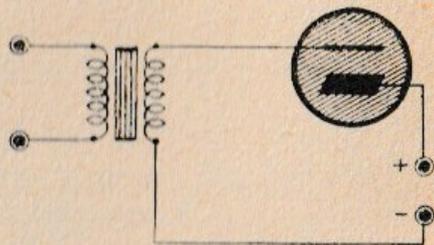


FIG. 16

entre les deux électrodes. Quand la polarité sera telle que l'électrode de grande surface A soit la cathode le tube pourra fournir une intensité de courant relativement grande, la chute cathodique demeurant normale. En revanche, dans l'autre sens, on sera très rapidement en présence d'une chute cathodique anormale.

Le tube présentera ainsi une conductibilité dissymétrique. C'est donc un redresseur (Fig. 16).

On peut naturellement imaginer des dispositifs à plusieurs électrodes.

Malgré sa simplicité, le système n'est pratiquement plus utilisé aujourd'hui. On préfère employer les redresseurs à cathode chaude ou à arc dans la vapeur de mercure.

Notons quelques inconvénients :

a) On ne peut redresser que des tensions relativement élevées supérieures à la tension d'amorçage ;

b) Le rendement est faible, par suite de la chute de tension importante dans le tube.

c) En cas de surcharge, on passe facilement de la décharge lumineuse à l'arc. Il n'y a plus de redressement et le tube peut être rapidement mis hors d'usage ;

d) Le système ne permet pas de redresser de grandes intensités ;

e) Le système produit des perturbations à haute fréquence, gênant les récepteurs voisins.

b) TUBES A ARC DANS LA VAPEUR DE MERCURE

35. — Généralités.

Le redresseur à arc dans la vapeur de mercure, ou, comme on l'écrit souvent pour abrégé, à arc de mercure est un des plus anciens dispositifs électroniques.

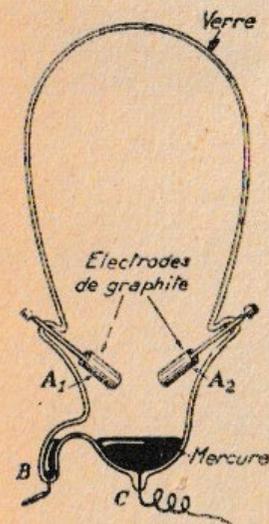


FIG. 17

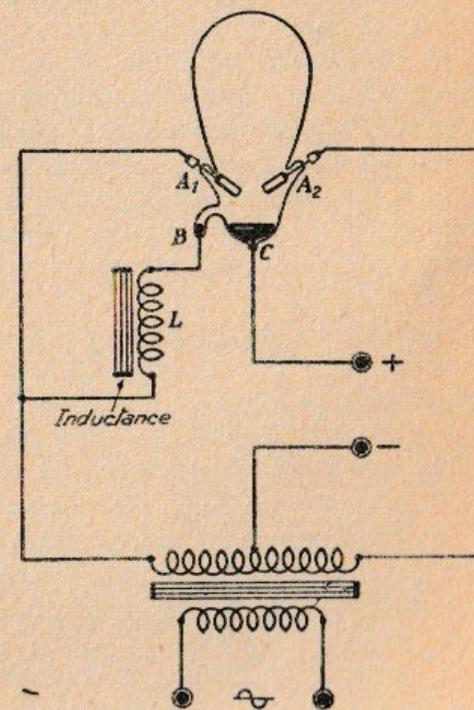


FIG. 18

Les redresseurs de faible puissance ont la forme représentée figure 17. Ils sont construits dans une ampoule de verre dont la

partie supérieure est en forme de dôme. La partie inférieure contient une réserve de mercure liquide, qui est la cathode. Il y a deux crayons de graphite placés latéralement, qui sont les anodes.

Un petit réservoir latéral contenant du mercure sert d'électrode d'allumage. Le tube est installé de manière à pouvoir être incliné, pour que le mercure du réservoir latéral *B* puisse venir en contact avec la masse liquide principale.

Avant l'introduction du mercure, on a fait un vide aussi parfait que possible dans l'ampoule.

Le montage est indiqué figure 18.

36. — Fonctionnement.

Le tube ne s'amorce pas de lui-même. L'allumage est obtenu en inclinant l'ampoule. Une goutte de mercure, en coulant de *B* en *C* ferme le circuit de l'électrode d'allumage *B*. Mais, à ce moment, la rupture du circuit provoque la naissance d'une surtension importante et d'une étincelle d'extra-rupture par suite de la présence de l'inductance *L*. Les ions ainsi produits amorcent le fonctionnement en diffusant dans l'ampoule.

On constate qu'un arc électrique éclate dans un sens tel que le mercure soit la cathode et qu'une des électrodes de graphite soit l'anode. Dans le sens contraire on est en présence d'une décharge lumineuse correspondant à une intensité négligeable.

Ainsi l'arc s'établit successivement, pour chaque alternance, entre le mercure et chacune des deux anodes. Le point de départ de l'arc sur le mercure est la *tache cathodique*, dont la température est de l'ordre de 6 000°. La vapeur de mercure se condense sur le dôme supérieur de l'ampoule et le liquide ruisselant sur les parois, retourne dans la réserve cathodique.

Le fonctionnement ne pourrait être assuré s'il s'agissait d'un tube monophasé, car l'arc s'éteindrait dès la fin de la première alternance. Il ne pourrait se réamorcer spontanément.

Il en serait de même s'il s'agissait de deux tensions exactement en opposition de phase (Fig. 19). Mais on peut tourner la difficulté en décalant légèrement une des tensions par rapport à l'autre.

Ainsi les tensions instantanées des deux anodes ne s'annulent pas au même moment et la décharge par arc peut s'entretenir.

Le déphasage doit être tout juste suffisant pour empêcher l'extinction. Un décalage exagéré pourrait se traduire par l'éclatement d'un arc entre les deux anodes.

Ce déphasage peut être obtenu par l'introduction d'une inductance en série dans une des branches ou, plus simplement, par un artifice de construction du transformateur.

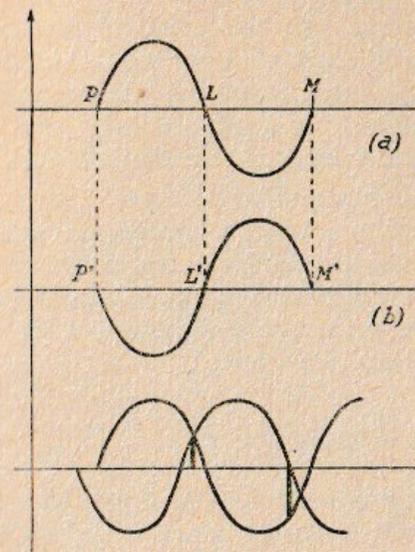


FIG. 19

37. — Mécanisme de production et d'entretien de la décharge.

Il s'agit bien d'un arc électrique. Nous avons donné plus haut la définition de ce type de décharge. Il faut que la cathode soit une source d'électrons de grande intensité. Le point d'extraction des particules est ici la *tache cathodique*, point extrêmement brillant qui circule sans arrêt à la surface du bain de mercure. Le diamètre de cette tache est d'une faible fraction de millimètre carré. La densité de courant peut varier de 1 000 à 5 000 ampères par cm^2 . Ainsi s'explique la très haute température atteinte localement.

La tache brillante est bombardée par des ions positifs, qui suppriment la charge d'espace électronique. L'afflux de ces projectiles produit une dépression dans le bain de mercure.

Des actions électromagnétiques provoquent les déplacements incessants du centre émissif.

On peut d'ailleurs « fixer » la tache cathodique au moyen d'une bande circulaire de métal émergeant du bain de mercure. L'intensité correspondant à une tache cathodique ne peut dépasser 35 ampères. Dès que cette valeur est dépassée, on constate que l'arc se ramifie de manière que l'intensité par branche, et par tache, soit inférieure à 35 ampères.

Malgré la très haute température atteinte, l'émission électronique ne s'explique pas par effet thermo-ionique. D'après Langmuir il s'agirait d'extraction par effet de champ. Le potentiel de sortie est pratiquement supprimé par l'importance locale du champ électrique. Ainsi, on peut prétendre que la tache cathodique, portée à 6 000°, est une... cathode froide.

Ce qui précède n'est qu'hypothèses. La vérité c'est qu'on ne connaît pas encore à l'heure actuelle la vraie nature de la tache cathodique. On ne sait point comment expliquer que ses déplacements, sous l'influence d'un champ magnétique, soient de sens contraire à ceux que permettraient de prévoir les lois de l'électromagnétisme classique.

38. — Electrodes d'entretien.

Un dispositif comme celui de la figure 17 ne peut convenir que pour un fonctionnement continu. Toute interruption se traduira par une extinction. Il faudrait réamorcer le tube pour le remettre en service.

On peut remédier à cet inconvénient en munissant le dispositif d'électrodes d'entretien (Fig. 20). Ce sont des électrodes auxiliaires qui doublent les électrodes principales. Elles sont alimentées par un enroulement spécial du transformateur ou même, éventuellement par un transformateur séparé.

Leur présence rend inutile le déphasage dont il a été question plus haut.

39. — Redresseurs de grande puissance.

Les unités de grande puissance sont construites dans des cuves en fer. Le vide de départ est assuré par l'action d'une pompe moléculaire. L'amorçage peut être obtenu par différents moyens : électrodes mobiles commandées par un électro aimant, surtension passagère, etc... Le refroidissement est assuré au moyen d'une circulation d'eau.

Des cloisons intérieures sont prévues pour éviter les arcs inverses. On peut naturellement construire des unités polyphasées.

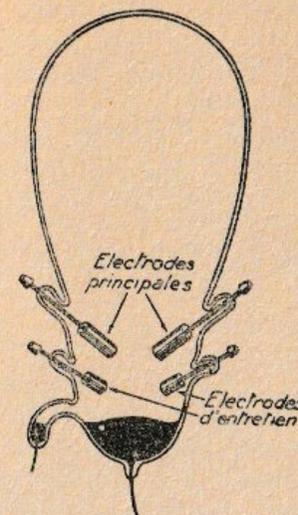


FIG. 20

40. — Puissance maximum.

L'intensité fournie par le redresseur est transportée presque exclusivement par les électrons. En effet la charge déplacée par des particules en mouvement est proportionnelle à ev , produit de la charge e par la vitesse v . La vitesse est inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse. Il en résulte que les intensités dues aux ions mercures et aux électrons sont entre elles comme $\sqrt{m/M}$. On peut donc bien admettre que l'intensité ionique est négligeable.

Augmenter l'intensité dans le redresseur, c'est augmenter la vitesse des électrons et éventuellement, leur nombre. Dans les deux cas, il en résulte une augmentation de la puissance dépensée dans le tube et, en conséquence, de la température. Cette dernière grandeur détermine la pression. Si la pression devient exagérément élevée, un arc peut s'établir dans les deux sens et le redresseur cesse d'accomplir sa mission.

Pour éviter ce risque de « l'arc inverse » il faut empêcher l'élévation de température et, pour cela, évacuer les calories supplémentaires qui sont produites. On peut donc en conclure

que la puissance n'est limitée que par les possibilités du système de refroidissement.

Si le redresseur est dans une cuve de verre, on peut le refroidir au moyen d'une circulation d'air prévu, par ventilateur. Dans les unités de grande puissance, nous avons déjà signalé qu'on utilisait une circulation d'eau pour refroidir non seulement la cuve, mais aussi les électrodes.

L'effet d'une surcharge de faible durée est sans aucune action sur le comportement ultérieur du redresseur.

CHAPITRE IV

TUBES A ÉLECTRODES DE CONTRÔLE ET A CATHODE FROIDE

41. — Généralités.

L'établissement de la décharge lumineuse dans un tube est déterminée par la répartition du champ électrique. On peut facilement agir sur cette répartition au moyen d'électrodes auxiliaires et, en particulier, de réseaux chargés ou *grilles*.

Il serait toutefois extrêmement hasardeux de vouloir établir un parallèle entre l'action d'une grille dans un tube à gaz et dans un tube à vide. Si l'on peut établir quelques analogies évidentes, l'examen approfondi révèle surtout d'essentielles différences. Il est d'ailleurs remarquable que le développement des tubes à électrode de commande est tout récent et recèle encore de nombreux facteurs inconnus, alors que les tubes à vide avaient déjà pris une structure définitive bien avant la dernière guerre. Par rapport aux tubes des années 30, les modèles les plus récents de tubes à vide ne présentent guère que des perfectionnements technologiques. On ne peut en écrire autant des tubes à gaz : on a l'impression que l'ère des développements structuraux n'est pas achevée.

Les tubes à décharge lumineuse contrôlée n'ont pas d'applications très importantes : cela tient sans doute à la faiblesse des intensités de courant mises en jeu. Leur grandeur ne diffère guère de celles qu'on réalise dans les tubes à vide de réception. Mais leur étude constitue une excellente introduction à celle des tubes à arc contrôlé dont les intensités peuvent se chiffrer en milliers d'ampères et qui prennent une importance industrielle chaque jour plus grande.

42. — Action d'une grille placée dans un plasma.

a) Grille négative.

La région voisine de l'anode est la colonne positive (voir page 21). Quand le tube est en fonctionnement stable, cette région est constituée par un *plasma*, c'est-à-dire qu'on y trouve sensiblement autant de charges positives que d'électrons. C'est pour cette raison que le gradient de potentiel y est très faible. Il est facile de prévoir qu'il ne peut en être autrement. S'il existait un gradient de potentiel, il y aurait immédiatement un déplacement des charges mobiles dont l'effet serait de « combler » ce gradient par le jeu de la charge d'espace.

Introduisons une grille négative. Elle attire immédiatement les ions positifs du plasma et repousse les électrons. La grille apparaît ainsi entourée d'une mince gaine ionique (Fig. 21). Il en résulte que le potentiel en un point quelconque A, situé à une certaine distance n'est pas modifié par le potentiel de la grille.

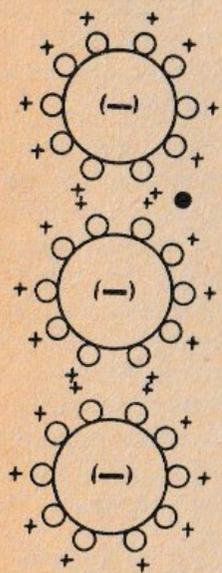


FIG. 21

Si nous appliquons une tension négative plus élevée, l'attraction ionique devient plus forte. La gaine positive devient plus épaisse mais rien n'est changé au niveau du point A.

On observe naturellement la présence d'un courant de grille dû à l'afflux de charges positives sur l'électrode.

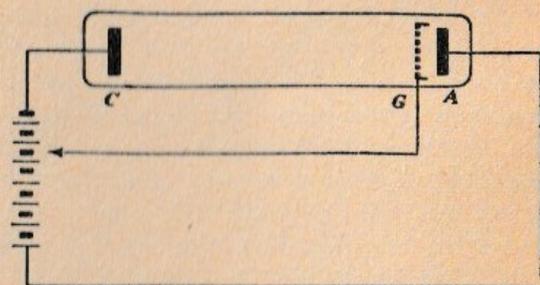


FIG. 22

Les gaines ioniques ainsi produites sont directement observables : elles ont la même structure que la gaine cathodique.

Pour que la présence de la grille puisse apporter une modification du potentiel du point A, il faudrait que les gaines ioniques de deux barreaux voisins fussent assez épaisses pour empiéter l'une sur l'autre. Cela suppose une grille au pas extrêmement serré ou l'emploi de tensions très élevées. Les deux choses sont généralement impraticables.

b) Grille positive.

C'est le phénomène inverse mais avec des conséquences pratiques qui sont les mêmes. La grille repousse les ions positifs et attire les électrons. Par suite de la plus grande mobilité de ces derniers, il n'y a point constitution d'une gaine directement observable, mais la charge négative d'espace entourant la grille neutralise son action à faible distance.

c) Grille flottante (non connectée).

Une grille non connectée, placée dans un plasma se charge négativement. Les électrons sont, en effet, beaucoup plus rapides que les ions.

Pendant un intervalle donné la grille reçoit ainsi un nombre plus élevé de projectiles négatifs que de charges positives. Son potentiel s'abaisse progressivement, jusqu'au moment où un équilibre s'établit, car, en devenant négative, elle attire davantage les ions et repousse les électrons.

Ainsi une grille non connectée, placée dans une décharge peut agir comme une électrode dont le potentiel est fixé.

43. — Tube avec grille de contrôle.

Dans un tube à cathode froide nous plaçons une grille au voisinage immédiat de l'anode. La grille est portée à une tension voisine de celle de la cathode et la tension entre anode et cathode est supérieure à la valeur d'allumage.

Pourtant, la décharge ne s'amorce pas. Par suite de la faible distance entre grille et anode, nous nous trouvons dans la branche de gauche de la courbe représentant la loi de Paschen.

Augmentons progressivement la différence de potentiel entre cathode et grille. Pour une certaine valeur la décharge s'amorcera entre les deux électrodes, et, en même temps, entre grille et anode, c'est-à-dire dans la totalité du tube.

La décharge étant amorcée, la grille perd toute action, ainsi que nous l'avons expliqué plus haut.

44. — Exemple de réalisation : Le « grid glow » Tube.

Un exemple de réalisation a été décrit par Knowles dans « Electronics » (juillet 1930).

La structure interne est donnée par la figure 23. La cathode est un cylindre entourant complètement les deux autres électrodes. La grille est un mince anneau dans l'axe duquel est placée l'anode, en forme de tige cylindrique. La décharge lumineuse entre grille et cathode s'amorce pour une tension de 270 volts. La tension d'extinction est de 170 volts.

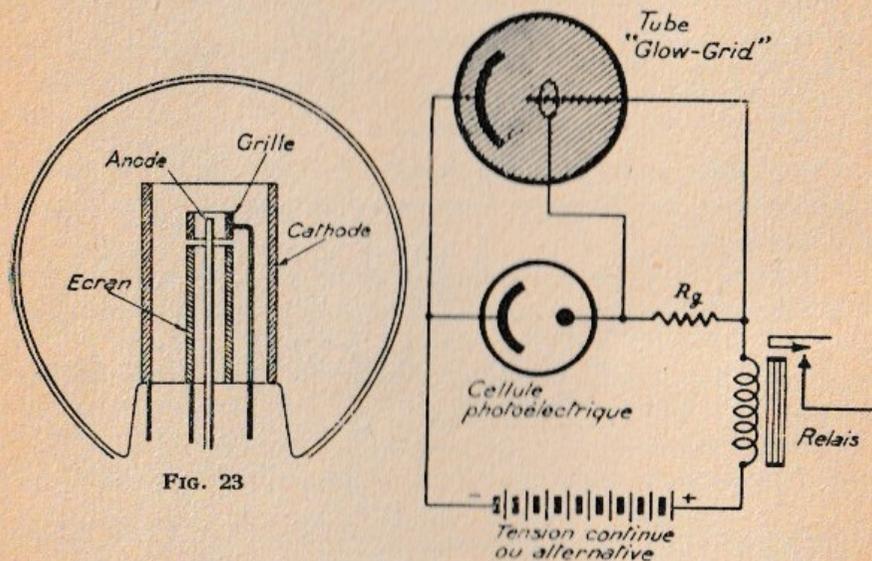


FIG. 24

La tension d'allumage entre cathode et anode est fonction de la tension d'anode ainsi que de l'intensité dans le circuit de grille.

Par suite de la dissymétrie des deux électrodes, le tube fonctionne comme un redresseur quand on l'alimente en courant alternatif. Le courant anodique a une valeur moyenne non nulle. A chaque alternance, la décharge s'éteint et la grille recouvre son pouvoir de contrôle. Les applications mettent en jeu le fait que l'allumage est déterminé par la tension de grille. La tension

de commande peut être fournie par un organe quelconque : thermo couple (sonde pyrométrique) cellule photoélectrique, etc...

Dans ce dernier cas on peut utiliser les circuits indiqués figure 24 et figure 25.

Dans le circuit de la figure 24 l'amorçage du tube est produit par une diminution d'éclairage de la cellule. En effet : la tension grille augmente puisque la chute de tension dans la résistance R_g diminue.

Avec le montage figure 25, c'est, au contraire, l'augmentation de lumière qui provoque l'amorçage. Il y a, en effet, augmentation de tension de grille puisque la résistance équivalente à

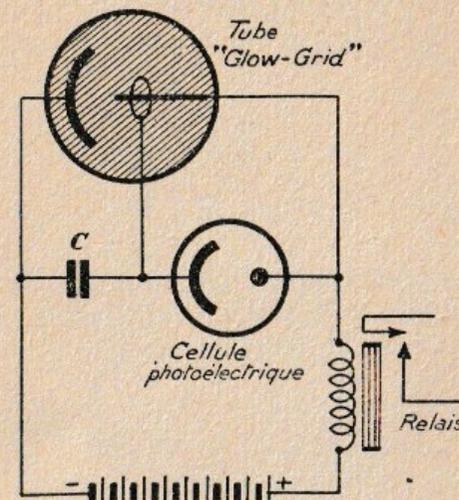


FIG. 25

la cellule diminue. Le condensateur a pour fonction de provoquer le passage d'un fort courant de grille au moment de l'amorçage.

L'alimentation peut être faite directement en courant alternatif. Dans ce cas il est inutile de prévoir un dispositif d'extinction ou de retour aux conditions initiales.

45. — Tubes à « starter ».

On peut aussi utiliser le *pouvoir des pointes* pour amorcer la décharge. C'est le principe de base du tube triode à cathode froide OA4, construit par la R. C. A. (Fig. 26).

L'anode est encore une tige de faible section. La cathode est annulaire. Le starter est une tige annulaire de faible dimension qui est très voisine de la cathode.

La tension d'amorçage entre anode et cathode est de 225 volts. En revanche, la tension d'amorçage entre cathode et starter est de 90 volts. La décharge ainsi amorcée se communique à l'anode principale à condition que la tension anode-cathode soit assez élevée et que le courant dans le circuit du starter soit assez intense. On retrouve donc ici les mêmes conditions que dans le tube précédent.

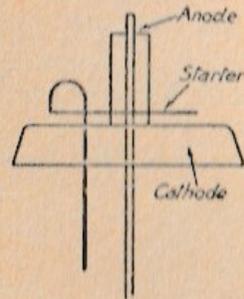


FIG. 26

Le tube fonctionne comme redresseur de courant. La tension d'amorçage peut être continue, alternative, ou même fournie par des circuits de haute fréquence.

TUBES TRICRUS A CATHODE FROIDE (Flow-discharge tube)

Type	Utilisation	Tensions (volts)		Intensité (mA)		Constructeur	Autres dénominations
		amorçage (starter)	inverse (max. min)	Max. (pointe)	Moyen		
OA4 G	Tube "Trigger". Machines à calculer. Relais	75 à 90	225	300	95	ECA Tungsool	EL 1267 Dario
10Ca	" sans enclenchement ou courant constant	66 à 80	180	100	95	ECA Tungsool	
OA5	Relais	90	250 max	?	?	Tungsool	-
5823	Relais	73 à 105	300	300	95	ECA	-
3313 CA	Relais	130 à 180	400	30	30	LCT	PTT-3004 LCT
3372 A	Relais	130 à 180	400	60	30	LCT	

TUBES REGULATEURS A CATHODE FROIDE

Type	Tensions (volts)				Intensités		Température	Constructeur
	Amorçage	Alimentation (min.)	Régulation	Marge de régulation	min.	max.		
OA2	156	185	151	2	5	30	- 55 à + 90	RCA.- MAZDA.- TUNG-SOL. SPR
OA3 VR75 G75/1D	100	105	75	5	5	40	"	RCA TUNG-SOL STANDARD TELEPH.
OB2	115	133	108	1	5	30	"	RCA
OB3 VR90	110	125	90	5	5	30	"	VISSEUX TUNGSOOL
OC3 VR105 Reg 110 4357	115	133	108	4	5	40	"	RCA MAZDA NEWTON PHILLIPS - DARTO
OD3 VR150	100	135	153	4	5	40	"	MAZDA VISSEUX RCA TUNG-SOL
874	115	130	90	7	10	50	"	RCA
991	67	87	59	8	0,4	2	"	RCA
5651	107	115	87	3	1,5	3,5	"	RCA
G150/1G	90		50	5	0,1	0,5	"	Standard
G120/1B	100		55	3	2	30	"	Standard
G180/2M	180	180	150	5	5	40	"	Standard
G400/1K	375 400 max		312	10	2	4	"	Standard
4687	140	190	85		10	40	"	Dario
100E1	140	105	90		50	200	"	Dario
150A1	205	170	150		1	8	"	Dario
150C1	205	166	145		5	40	"	Dario
RT 75/25	110	115	75	?	5	15		LCT
3313	130	140	75	?	5	15		LCT
RT 150/200	200	200	150	?	50	200		LCT
RT 280/40	340	350	280	?	10	40		LCT
RT 280/80	340	350	280	?	10	80		LCT

CHAPITRE V

DIODES A CATHODE CHAUDE
ET A ATMOSPHERE

46. — Généralités.

La présence d'une cathode chaude transforme la décharge en arc électrique, c'est-à-dire en une décharge dont la chute de tension peut être très faible.

Cette chute de tension est pratiquement indépendante de la distance des électrodes et de l'intensité de courant. Elle est de l'ordre de 15 volts dans la vapeur de mercure, elle est de 3 à 6 volts dans la vapeur de caesium.

Pour apprécier la différence avec un tube à vide, on peut avoir recours à un exemple numérique cité par Hull. Imaginons un tube dans lequel anode et cathode sont deux plans parallèles, distants de un centimètre.

Dans le vide, pour obtenir le passage d'une intensité de courant de 1 ampère par centimètre carré, il faut consentir à une chute de tension de 10 000 volts. Alors qu'un tube à vapeur de caesium permet d'obtenir 20 Ampères par centimètre carré avec une chute de tension de 3,5 volts seulement !

47. — Neutralisation de la charge d'espace.

Dans le vide, les difficultés sont produites par la charge d'espace. Les électrons extraits de la cathode, sont repoussés par les autres électrons déjà en mouvement vers l'anode. On ne peut avoir raison de cette action que si les électrons sont très éloignés les uns des autres. *Il faut donc nécessairement que les électrons soient peu nombreux entre cathode et anode.* Pour assurer, dans ces conditions, le passage d'une quantité d'électricité donnée dans l'unité de temps *il faut augmenter la vitesse des électrons.* Il faut donc les soumettre à une différence de potentiel élevée !

Dans l'arc électrique, les électrons peuvent être beaucoup plus nombreux par unité de volume *parce qu'ils sont accompagnés par des charges positives qui neutralisent leur action.*

Les ions positifs sont beaucoup plus lourds que les électrons et, par conséquent, se meuvent beaucoup plus lentement. Il en résulte qu'un ion positif séjourne beaucoup plus longtemps qu'un électron dans un espace donné. Il peut ainsi neutraliser un nombre d'électrons d'autant plus grand qu'il est plus lourd. LANGMUIR a établi qu'un ion mercure neutralise 229 électrons, alors qu'un ion hydrogène n'en neutralise que 23...

On conçoit, d'après cela, que la chute de tension soit d'autant plus faible que la densité ionique est plus élevée. Le problème que nous examinons ici est le même que celui de la conductibilité des métaux. La résistivité d'un métal est faible si le nombre d'électrons libres est grand. Ces électrons libres ont nécessairement à leur voisinage immédiat, autant d'ions positifs. Dans ce cas le passage du courant peut être assuré au moyen de très nombreux électrons animés d'une très faible vitesse. Pour leur communiquer cette vitesse, il suffit alors d'une très faible chute de tension. Ainsi dans le cuivre, pour assurer le passage d'une intensité de 20 ampères par centimètre carré, il suffit d'une chute de tension de 30 microvolts.

48. — Conditions d'amorçage d'un arc électrique.

Pour qu'il y ait naissance d'un arc, il faut que la surface cathodique soit une région de forte ionisation. Il faut donc une émission électronique. C'est ce qu'on peut obtenir par différents moyens, et, en particulier, par émission thermo-électronique. Toutefois le comportement de la cathode et les propriétés de l'arc varient notablement avec la pression. Il est ainsi essentiel de faire une différence entre les tubes à arc à haute et à basse pression.

49. — Tubes à haute pression.

Le modèle de ce genre de tube est le redresseur « Tungar » (de : *Tungstène* et *Argon*) dont la construction remonte à 1915. Beaucoup de tubes utilisant les mêmes principes ont été construits sous différents noms.

La pression interne est de l'ordre de 0,1 à 10 centimètres de mercure. Le gaz utilisé est généralement un gaz inerte : argon, néon, helium.

Le filament est une spirale de tungstène thorié, ou recouvert d'oxydes.

La présence d'une atmosphère relativement dense, limitant la vitesse d'évaporation permet de faire travailler le filament à une température élevée. Il en résulte que l'émission atteint de très fortes valeurs : de un ampère à plusieurs dizaines d'ampères pour certains tubes. Il est difficile de connaître exactement le comportement de la cathode en tungstène thorié dans ces circonstances. On suppose toutefois que les atomes de thorium évaporés sont immédiatement ionisés et, en conséquence, retournent vers la cathode. C'est un fait que la durée de vie de ces tubes est extrêmement longue.

La très forte densité ionique permet d'expliquer la faible chute de tension qui ne dépasse pas 5 volts. Dans ces conditions, on peut donc, comme dans certains tubes, utiliser une cathode à oxydes : les ions bombardant la cathode n'acquièrent pas une vitesse suffisante pour être destructeurs.

50. — Danger d'arc inverse.

La forte densité ionique n'amène pas que des avantages : les risques d'éclatement d'un arc inverse augmentent avec la pression. Il en résulte que le tube ne peut point supporter de tensions inverses élevées. En fait les tubes de ce modèle sont généralement prévus pour la charge de batteries d'accumulateurs d'une tension inférieure à 50 volts.

On peut adapter ce genre de tube au redressement de tensions plus élevées. Il faut, pour cela, allonger le parcours de l'arc.

Dans certains cas, on va même jusqu'à placer l'anode dans un compartiment séparé de l'ampoule, relié au récipient principal, par une canalisation plus étroite. On peut aussi entourer l'anode ou les anodes, par une grille non reliée, dont l'action a été expliquée (page 40).

51. — Régulation : caractéristique d'arc.

Ces redresseurs ont une caractéristique de régulation bien supérieure à celle des tubes à vide, puisque la chute de tension est pratiquement indépendante de l'intensité. C'est précisément une des propriétés de la décharge par arc.

Il se peut même que cette caractéristique soit trop bonne, car la résistance est négative et toute augmentation d'intensité amène une réduction de résistance interne équivalente. Il faut

alors prendre des mesures pour éviter la surcharge accidentelle du tube. Un moyen fréquemment employé consiste à placer en série un élément dit *ballast* ou régulateur dont la résistance croît avec l'intensité. On peut utiliser par exemple un filament métallique travaillant à l'incandescence. Il est évident que cette sécurité n'est obtenue qu'un détriment du rendement. Il en est de même avec le procédé qui consiste à insérer une inductance dans le circuit du transformateur. Cette inductance peut ne pas être apparente : on calcule simplement le transformateur pour qu'il possède une importante dispersion.

52. — Exemple : tube « Tungar ».

Le croquis figure 27 donne la disposition des électrodes dans un tube « Tungar ». L'anode est un disque de graphite. La cathode est un filament spiralé de très forte section. Il est évident que ce filament est traversé simultanément par le courant de chauffage

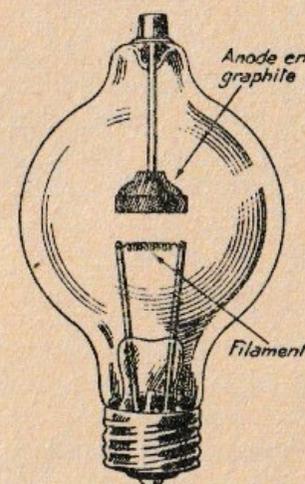


FIG. 27

et par le courant redressé. Ce dernier est unidirectionnel. Il en résulte qu'il s'ajoute algébriquement au courant de chauffage dans une moitié du filament et qu'il s'en retranche dans l'autre.

Cet effet est négligeable dans les tubes à vide car l'intensité du courant redressé est généralement faible par rapport à celle du courant de chauffage. Mais ici, le courant redressé peut être de plusieurs ampères. Il faut faire en sorte que l'intensité de chauffage soit beaucoup plus élevée. La seule solution est de

prévoir un filament chauffé sous très faible tension : 0,25 volt, par exemple. Cette nécessité est encore une source de complications car la réalisation des contacts devient très délicate.

53. — Tubes à basse pression.

En utilisant une pression intérieure beaucoup plus faible, on réduit les risques d'arc inverse et on peut construire des tubes redressant des tensions beaucoup plus élevées. Toutefois, les premiers essais furent assez décevants.

Il est en effet impossible d'adopter des cathodes travaillant à haute température, parce que l'évaporation est trop rapide. Mais les cathodes à oxydes, dont le rendement électronique est excellent à basse température, sont rapidement désagrégées par le bombardement ionique. Le fait essentiel qui devait être découvert plus tard, c'est que la désagrégation n'est pas à craindre tant que la chute de tension dans le tube ne dépasse pas un certain chiffre : 20 volts, par exemple, pour la vapeur de mercure et l'argon.

Les dispositifs électroniques ne peuvent avoir un intérêt industriel que si le rendement qu'on en obtient est comparable à celui que donnent les autres procédés. Il faut donc s'efforcer de rendre négligeable la puissance perdue pour le chauffage de la cathode. En d'autres termes, il faut augmenter le rendement électronique.

54. — Cathodes à écran thermique.

Dans les filaments ou cathodes utilisés dans les tubes à vide une fraction importante de la puissance de chauffage est perdue en chaleur ou en rayonnement (lumière visible et, surtout, infrarouge). Il faut obtenir que la plus grande partie de l'énergie de chauffage soit utilisée à vaincre le potentiel de sortie de la cathode.

Nous avons reconnu plus haut que, dans les tubes à vide, il était essentiel de communiquer une grande vitesse aux électrons. Ceux-ci doivent donc être nécessairement soumis à l'action du champ électrostatique entre anode et cathode. En d'autres termes, la cathode doit être exposée directement à l'action de l'anode.

S'il en était autrement, l'augmentation de la charge d'espace rendrait nécessaire l'emploi d'une tension anodique encore plus élevée.

Dans les tubes à atmosphère, la suppression de la charge d'espace dispense de cette nécessité. Au lieu d'un flot, rapide

d'électrons allant en ligne droite de la cathode vers l'anode nous avons un courant très dense et très lent de particules chargées. Il importe peu qu'on allonge le trajet de ce flot ionique puisque le gradient de potentiel y est négligeable.

55. — Cathode à blindage thermique.

On arrive ainsi à la notion de *cathode à blindage thermique*. Nous donnons un exemple de réalisation figure 28. La cathode est un cylindre garni intérieurement de cloisons radiales. Le chauffage est assuré par un élément chauffant placé dans l'axe

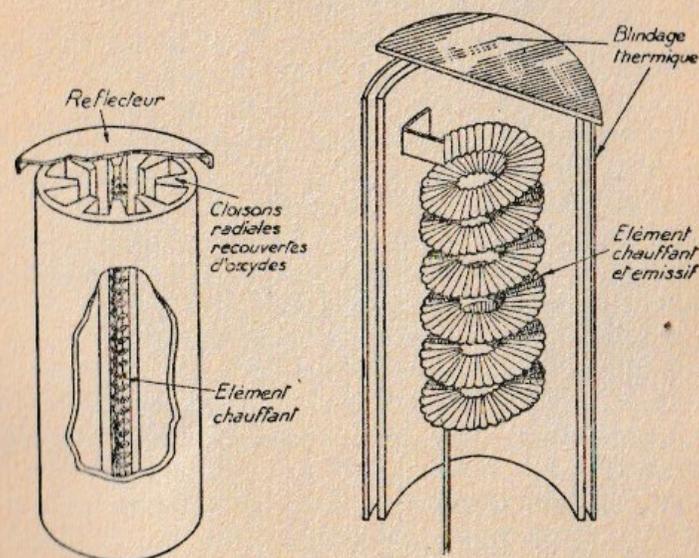


FIG. 28

FIG. 29

du cylindre. Les oxydes émissifs sont placés sur les parois intérieures du cylindre. On améliore encore le blindage thermique en utilisant deux cylindres concentriques et en montant des disques réflecteurs aux deux extrémités.

Une autre disposition est indiquée figure 29. L'élément chauffant est, en même temps, surface émissive et le blindage thermique comporte plusieurs cylindres concentriques.

De nombreuses dispositions sont possibles. On notera dans tous les cas que l'émission thermoélectronique doit être toujours largement suffisante pour assurer la totalité de l'intensité nécessaire. De plus, toute augmentation de rendement électronique se traduit par une augmentation d'inertie calorifique.

Le temps de chauffage est, dans certains cas, de l'ordre d'une heure... ce qui n'est pas sans inconvénient quand la nécessité se présente de mettre de nouvelles unités en service.

La tension de chauffage doit être inférieure au potentiel minimum d'ionisation du gaz utilisé. S'il en était autrement une décharge éclaterait entre les deux extrémités et les ions ainsi produits nuiraient au fonctionnement du tube (tout spécialement quand il y a une électrode de commande).

56. — Intensité limite. Oscillations. Surtensions.

Quand on atteint l'intensité maximum que peut normalement fournir le tube on observe souvent des irrégularités de fonctionnement accompagnées, parfois, de surtensions importantes. Le mécanisme de ces accidents serait le suivant : le maximum d'intensité correspond à l'ionisation de tous les atomes présents dans le plasma. Quand il en est ainsi et qu'on augmente la puissance fournie par le tube, on observe d'abord une augmentation de la chute de tension interne. Après quoi, de très violentes oscillations se produisent, comme si la densité ionique tombait brusquement à une valeur très faible pour augmenter de nouveau avec une fréquence de l'ordre du mégacycle/s. Ces variations rapides ont le même effet qu'une coupure brutale de la charge. Il en résulte nécessairement des surtensions très importantes dans les enroulements du transformateur d'alimentation et des risques de claquage des isolants.

On peut éviter l'amorçage de ces oscillations parasites en shuntant le redresseur par des capacités de valeur convenable.

57. — Puissance maximum et température.

Si l'on cherche à augmenter l'intensité redressée, on risque — comme nous venons de l'indiquer — de provoquer de l'instabilité de fonctionnement. Même dans le cas où ce phénomène dangereux ne se produirait pas, l'augmentation d'intensité ne pourrait être obtenue que par une double ionisation. Les particules seraient alors assez rapides pour désagréger la cathode par bombardement.

La limite dépend évidemment du nombre d'atomes présents dans le plasma, c'est-à-dire de la température, qui détermine la pression interne.

On admet généralement que la densité de courant limite est de 60 Ampères par centimètre carré pour une température

de 50 centigrades. La pression de vapeur du mercure est alors de 13×10^{-1} mm de mercure.

A 60°, la pression serait double et par conséquent, on pourrait doubler l'intensité mais les risques d'arc inverse deviendraient beaucoup plus grands.

58. — Arc inverse.

Dans le sens de non-conduction le courant qui passe entre électrodes est normalement celui d'une décharge luminescente, dans la région de chute cathodique anormale. L'intensité est assez faible pour être négligeable.

Toutefois, un arc peut éventuellement éclater en sens inverse. Si le phénomène est purement accidentel et ne se produit que pour une seule alternance, il n'est généralement pas grave. Il en est tout autrement s'il se reproduit pour un grand nombre d'alternances successives.

Il est à peu près impossible d'éviter complètement l'arc inverse, même dans les conditions normales d'emploi. On observe qu'il se produit avec un certain rythme quand le tube est neuf, puis, le tube subit une sorte de maturation ou de formation et l'arc inverse ne se produit pratiquement plus. Quand il se présentera de nouveau avec une fréquence de plus en plus grande, c'est que le tube sera au bout de sa vie.

Les causes qui produisent le phénomène sont nombreuses : influence de l'ultra-violet sur l'anode, échauffement anormal de la surface anodique, émission secondaire, etc...

D'après K. H. KINGDON, la cause déterminante est la présence sur l'anode de particules isolantes qui prennent une charge positive. Elles s'entourent ainsi d'un champ électrostatique qui peut atteindre un million de volts par centimètre et deviennent ainsi des centres émissifs. Il y a formation d'une tache cathodique sur l'anode et éclatement d'un arc.

Il est évident que la tendance à l'arc inverse augmente avec la tension appliquée entre électrode. C'est le facteur qui limite précisément la tension redressée par un tube donné. Il faut aussi faire intervenir la pression interne qui est fonction de la température.

L'arc inverse s'établit grâce à la présence des ions résiduels. Or la durée de désionisation s'accroît avec la température et, par conséquent le nombre d'ions présents dans l'intervalle de deux périodes conductrices.

59. — Données limites. Tension inverse de pointe. Intensité maximum de pointe. Intensité moyenne, etc...

C'est le maximum de tension appliquée pendant les intervalles de non conduction qui provoque l'éclatement de l'arc inverse. La valeur dangereuse dépend de la construction du tube, de la nature du gaz de la température et de la fréquence du courant.

La tension inverse de pointe maximum est fixée par le constructeur. Cette tension est égale à la tension de pointe fournie par l'enroulement d'alimentation à laquelle il faut ajouter la tension continue à l'entrée du filtre et la valeur maximum de la tension d'ondulation, dans le cas d'un filtre avec capacité d'entrée. S'il s'agit d'un filtre avec une inductance d'entrée de valeur suffisamment grande, on peut admettre que la tension inverse est égale à la tension de pointe fournie par l'enroulement secondaire.

L'intensité maximum de pointe est le maximum de la valeur instantanée d'intensité dans le tube. C'est une valeur qui varie également avec la température, car elle est fonction de la densité ionique. Elle croît avec la température alors que la tension inverse admissible décroît. Ainsi, tel tube pourra supporter une tension inverse de pointe de 10 000 volts et une intensité de pointe de 1 ampère à la température maximum de 60°. Si la température est de 70°, la tension inverse ne doit pas dépasser 2 000 volts, mais, en revanche l'intensité de crête peut atteindre 2 ampères.

L'intensité moyenne redressée est celle que l'on peut mesurer dans le circuit avec un ampèremètre à cadre. Elle dépend surtout de la cathode utilisée. Toutefois, en fonctionnement permanent, sa grandeur varie dans le même sens que l'intensité de pointe.

60. — Précautions générales d'emploi.

Il est absolument essentiel que la cathode ait atteint la température normale de fonctionnement avant l'application de la haute tension. S'il en était autrement, pendant la période d'échauffement l'émission électronique serait limitée à certains points de la surface cathodique. Il y aurait désagrégation de la matière et destruction des oxydes émissifs en ces points. Ainsi la surface entière serait très rapidement détruite.

La période de chauffage peut, suivant les modèles, varier entre quelques secondes et une heure. Quand il s'agit d'une durée de quelques dizaines de seconde, on prévoit généralement un enclenchement automatique de la haute tension par l'intermédiaire d'un contact thermique à bi-lame.

Il est essentiel d'éviter que des champs à haute fréquence ne puissent agir sur le tube. On prévoit des filtres et des blindages appropriés.

Le tube doit être convenablement ventilé pour maintenir la température dans les limites fixées. Les tubes utilisant du mercure liquide ne peuvent généralement être montés que dans une position déterminée.

Nous donnons, dans les 4 pages suivantes, les caractéristiques des tubes diodes redresseurs à cathode chaude de toutes marques, comportant une atmosphère gazeuse.

1°) Tubes « phanotrons » redresseurs à vapeur de mercure, ou à gaz rare, de toutes puissances : pages 56 et 57.

2°) Tubes redresseurs à gaz à basse tension anodique : pages 58 et 59. (tensions appliquées aux plaques : de 28 à 285 volts).

TUBES PHANOTRONS

Type	Description	Chauffage cathode		Valeurs maxima					Conditions pour 2 tubes				Constructeur
		Volts	Ampères	Température	Tension Inverse de pointe (volts)	Intensité de pointe (Ampères)	Intensité moyenne (Ampères)	Surcharge	Tension inverse de pointe (volts)	Tension de plaque à plaque (volts)	Tension continue (volts)	Intensité max. (Amp.)	
82	Biplaque vap.mercure	2,5	3	24 à 60°	1550	0,345 par anode	0,115	3,45					RCA TUNG-SOL
83	"	5	3	20 à 60°	1550	0,675 par anode	0,225	6,75					
575A	Monoplaque vap.mercure	5	10	25 à 50°	15 000	6	1,5	60	15 000	10 600	4780	3	RCA Westinghouse
673	"	5	10	25 à 50°	15 000	6	1,5	60	15 000	10 600	4780	3	RCA
816	"	2,5	2	20 à 60°	7500	0,5	0,125	60	7500	5300	2390	0,25	RCA Westinghouse
857B	"	5	20	30 à 40°	22 000	40	10	400	22 000	15 500	7000	20	RCA Westinghouse
856A	"	2,5	5	25 à 60°	10 000	1	0,25	10	10 000	7070	3180	0,5	RCA
VH550	Monopl.	2,5	5	20 à 60°	10000	1	0,350	10	10000	7070	3180	0,7	SFR
VH550A	Vap.merc.	2,5	5	10 à 50°	10000	1,5	0,400		10000	7100	3200	0,8	Verr. Sc.
10000-0,4 R	"	2,5	5	10 à 50°	10000	1,5	0,400		10000	7100	3200	0,8	" "
VH550 A	monopl. à gaz	2,5	5	-55 à 90°	10000	1,5	0,350	12	10000	7070	3180	0,7	SFR
10000-0,25R	monopl. à gaz	2,5	5	-75 à 90°	10000	1	0,250	-	10000	7100	3200	0,5	Verr.Sc.
2M600A				25 à 70°	2000	2	0,5	20	2000	1410	635	1	Westinghouse
PA502A													Mazda
2V/400A													Thomson-Houston Standard L.
869B 2V/530C	"	5	19	30 à 40°	20 000	10	2,5	100	20 000	14 000	6300	5	RCA Standard Westinghouse
AX50	Biplaque vap.merc.	4	3,75	20 à 60°	1350	0,600	0,250	-	Transfo : 2 x 500 V max.				Dario
3075A	"	2,5	7,5	25 à 65°	5000	1,5	0,5	1					LCT
VH400	Monopl. à gaz	5	7,5	-55 à 90°	10000	5	1,25		10000	7070	3180	2,5	SFR
7500-0,6I	"	2,5	6,5	-75 à 90°	7500	2,5	0,6						Verr.Sc.
VH-8500	"	5	20	20 à 60° 60 à 70°	10000 5000	20 20	5 5		10000	7070	3180	10	SFR
3077A	Monopl. vap.merc.	5	10	25 à 65°	16000	5	1,25						LCT
3078A	"	5	20	25 à 65°	20000	10	2,5						LCT
3079A	"	5	40	25 à 60°	20000	20	7,5						LCT
3080A	"	5	100	25 à 60°	16000	50	20						LCT
872A PA5031 VH-7400	Monopl. vap.merc.	5	7,5	20 à 60°	10 000	5	1,25		10 000	7070	3180	2,5	RCA Westinghouse Thomson SFR
5558 PA5050 2V/471C	"	5	4,5	30 à 60°	5000	15	2,5	200	5000	4545	1590	5	RCA Westinghouse Thomson Standard
5561	"	5	10	40 à 80°	3000	12,8	6,4	400	3000	2125	955	12,8	RCA Westinghouse
8008	"	5	7,5	20 à 60°	10 000	5	1,25		10 000	7070	3180	2,5	
PA 9040		5	20	-35 à 45°	17 500	8	2			5500		4	Thomson-Houston
PA 5071		5	30	-30 à 40°	22 000	40	10	400	22 000	15 500	7000	20	Thomson-Houston
12RM12 8RM16 2RM3	"	5 5 2,5	6,5 3,7 3,5	-40 à 90° " "	12 000 8 000 2 000	5 2,5 1	1,25 0,6 0,3						néotron et Verr.Sc.

TUBES A GAZ A BASSE TENSION

Type	Description	Chauffage		Tensions (volts)			Intensités max.		Constructeur	Autres Marques
		volts	ampères	Alimentation		Inver- se de pointe	moyenne	max.		
				max.	min.					
328	Redresseur bi-plaque. Charge accumulateurs	1,85	2,8	2 x 28	2 x 16	80	1,3	4	Philips	Dario
367	"	1,85	8	2 x 45	2 x 16	125	6	18	"	Dario
451	"	1,85	2,8	2 x 16	2 x 10	45	1,3	4	"	-
1010	"	1,85	3,5	2 x 60	2 x 16	170	1,3	4	"	Dario
1037	"	1,92	11	2 x 60	2 x 15	170	6	18	"	-
1039	"	1,92	18	2 x 60	2 x 10	170	15	45	"	Dario
1048	"	1,92	7	2 x 60	2 x 10	170	6	18	"	Dario
1049	"	1,92	30	2 x 60	2 x 10	170	25	75	"	Dario
1053	Tubes pour sou- dure électrique	1,92	45	2 x 48	2 x 10	135	25	75	"	-
1054	"	1,92	73	2 x 48	2 x 30	135	40	120	"	-
1059	Chargeur d'ac- cumulateurs	1,92	40	2 x 60	2 x 10	170	40	120	"	-
1063	Charge accumu- lateur triphasé Tube avec élec- trode d'amorçage	1,92	11	3 x 250	1 x 130	700	6	12	"	-
1069	Tube pour sou- dure	3,25	70	2 x 55	2 x 35	155	60	200	"	Dario
1089	Chargeur d'ac- cumulateurs	1,92	11	2 x 60	2 x 16	170	10	30	"	-
1110	"	1,85	3,5	2 x 60	2 x 16	170	2	6	"	Dario
1119	"	1,85	5,5	2 x 45	2 x 12	127	3	9	"	Dario
1129	"	1,85	5,5	2 x 60	2 x 12	170	3	9	"	-
1138/0	Monoplaque	2,5	27	85	20	240	15	85	"	Tungar 18023B
1148	Monoplaque	2,25	10	50	15	140	6	36	"	Tungar 278 148
1149	"	2,25	10	100	25	260	6	36	"	" 278 149
1163	"	2,25	17	130	20	175	6	36	"	Dario
1164	"	2,5	25	80	60	225	15	90	"	Dario
1173	Monoplaque avec électrode d'a- morçage	1,92	13	220	20	625	4	24	"	Dario
1174	"	1,92	12	220	20	625	6	36	"	Dario

Type	Description	Chauffage		Tensions (volts)			Intensités max.		Constructeur	Autres Marques
		volts	ampères	Alimentation		Inver- se de pointe	moyenne	max.		
				max.	min.					
1176	Monoplaque avec électrode d'a- morçage	1,92	37	220	20	625	15	90	Philips	Dario
1177	"	1,92	70	220	20	625	25	150	"	Dario
1533	Triphasé avec électrode an- xillaire d'a- morçage	1,92	23	3 x 275	3 x 60	775	15	45	"	-
1534	Biplaque avec électrode aux. d'amorçage	1,92	23	2 x 275	2 x 60	775	15	45	"	-
1543	Triphasé avec électrode aux. d'amorçage	1,92	36	3 x 275	2 x 60	775	25	70	"	-
1544	Biplaque avec électrode aux. d'amorçage	1,92	36	2 x 275	2 x 60	775	25	70	"	-
1553	Triphasé avec électrode aux. d'amorçage	1,92	70	3 x 275	3 x 60	775	40	135	"	-
1554	Biplaque avec électrode aux. d'amorçage	1,92	70	2 x 275	2 x 60	775	40	135	"	-
1564	"	1,92	70	2 x 275	2 x 60	775	60	135	"	-
1710	"	1,92	7	2 x 150	2 x 25	425	3	9	"	Dario
1725	"	1,92	3,5	2 x 150	2 x 22	425	1,3	4	"	Dario
1729	"	1,92	8	2 x 95	2 x 20	270	6	18	"	-
1738	"	1,92	18	2 x 95	2 x 20	270	15	45	"	-
1749	"	1,92	25	2 x 95	2 x 30	270	25	75	"	-
1759	"	"	70	2 x 95	2 x 20	270	50	150	"	-
1768	"	1,92	-	2 x 265	2 x 130	810	6	10	"	-
1788	"	1,92	-	2 x 95	2 x 20	270	10	30	"	-
1820	"	1,92	8,5			325	6	18	"	-
1838	"	1,92	22,5			325	15	45	"	Dario
1849	"	1,92	30			325	25	75	"	Dario
1859	"	1,92	70			325	40	120	"	Dario
1888	"	1,92	11,5			325	10	30	"	-

CHAPITRE VI

LES THYRATRONS

Étude Générale

61. — Généralités.

Dans les tubes que nous venons d'étudier, l'amorçage de l'arc est déclenché par les électrons produits par la cathode et attirés par l'anode. Avant l'amorçage, le fonctionnement est identique à celui d'un tube à vide.

Dans un tube à vide, il est possible de contrôler le courant anodique au moyen d'une grille qui intercepte les lignes de force électriques entre anode et cathode. En particulier, si la tension négative appliquée sur la grille est assez élevée les électrons ne peuvent point quitter la cathode et il n'y a aucun courant entre cathode et anode. On peut donc facilement concevoir qu'une électrode de contrôle, placée entre anode et cathode puisse empêcher l'éclatement de l'arc.

Pour amorcer la décharge, il suffit que quelques électrons un seul même, en principe, puisse franchir la grille pour atteindre l'anode. Cet amorçage correspondrait, dans un tube triode, à la naissance du courant anodique. On sait que la tension de grille correspondante, ou tension de coupure dépend de la construction du tube (structure de cathode, de grille, de plaque, distances, pas de la grille, etc.). Pour une structure géométrique donnée elle varie avec la tension appliquée à l'anode.

Toutes ces données peuvent immédiatement se transposer dans le cas du tube à gaz.

62. — Principe des tubes thyratrons.

En première approximation, on peut se représenter un thyatron comme un tube triode à atmosphère comportant : cathode chaude émissive, grille de commande et anode.

On applique une certaine tension anodique, l'électrode de contrôle étant portée à une très forte tension négative.

L'amorçage ne se produit pas car aucun électron ionisant ne peut traverser l'espace cathode-anode. En diminuant progressivement la valeur absolue de la tension négative de grille, il arrive un moment où un électron peut s'élancer vers la plaque. Il y a ionisation en avalanche (voir page 15) et d'une manière pratiquement instantanée (quelques microsecondes). L'arc éclate donnant passage au courant anodique.

Dès que l'amorçage se produit, la grille ne possède plus d'action de contrôle. Tout se passe pratiquement comme si elle cessait d'exister. Pour faire cesser le courant, il faut annuler la tension anodique. Après un temps de désionisation qui est généralement de l'ordre de la milliseconde, la grille acquiert de nouveau son pouvoir de contrôle.

En toute rigueur, avec certains modèles de thyratrons, on peut éteindre l'arc en appliquant une tension négative sur l'électrode de contrôle, mais cette propriété est sans importance pratique car la tension nécessaire négative est du même ordre de grandeur, sinon supérieure à la tension anodique.

63. — Rapport de commande.

Une modification de la tension d'anode, entraîne une modification correspondante de la tension de grille déterminant l'amorçage. Plus la tension anodique est élevée et plus la grille doit être négative pour maintenir le tube non amorcé. Entre les deux variations de tensions il existe un rapport sensiblement constant qui est le *rapport de commande*.

L'analogie est évidente entre ce facteur et le *coefficient d'amplification* d'un tube triode. Dans les deux cas, l'élément essentiel est la structure géométrique : distances des électrodes, dimension des ouvertures de grille. Il y a toutefois cette différence que, dans le thyatron, le rapport de commande varie quelque peu avec la température du gaz c'est-à-dire avec la pression intérieure. On déduira facilement le rapport de commande des courbes données figure 30, à titre d'exemple.

64. — Principes de construction.

Quand il s'agit d'un tube à vide, il est généralement sans conséquence que le contrôle des électrons ne soit pas total. Peu importe que quelques électrons puissent échapper à l'action de

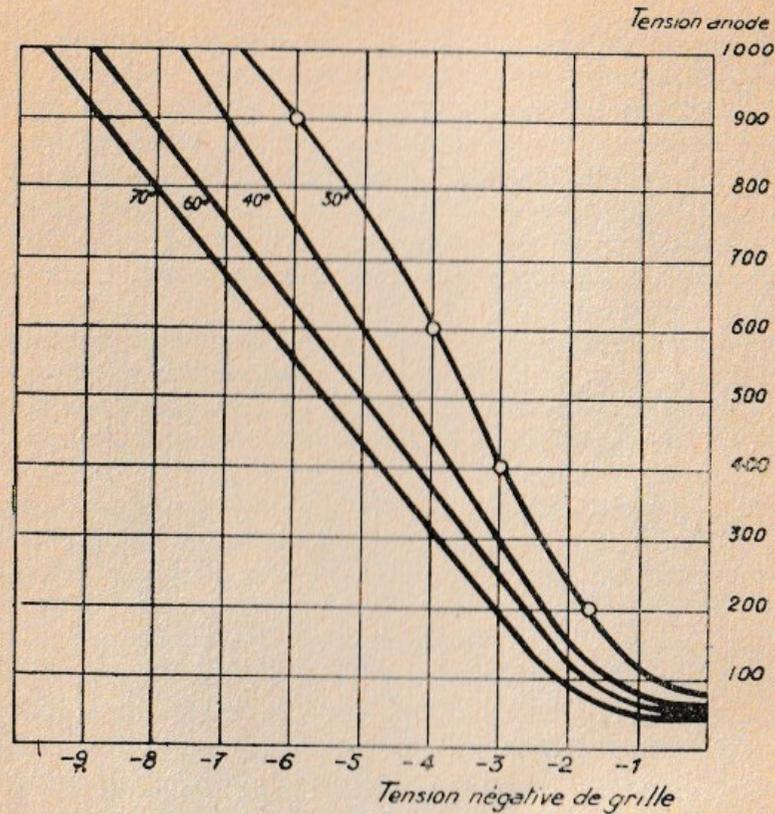


FIG. 30

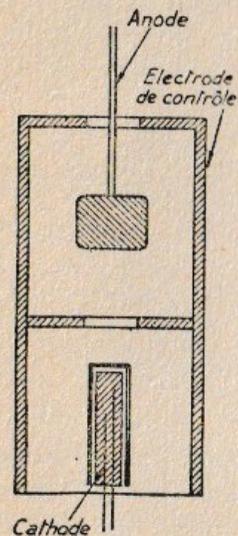


FIG. 31

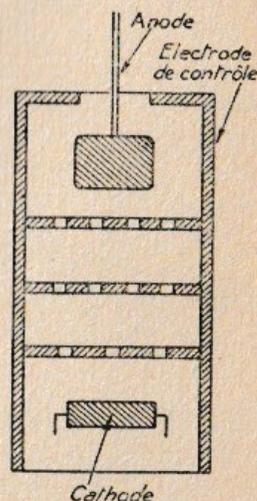


FIG. 32

la grille et se rendent ainsi directement de la cathode à l'anode. Le très faible courant anodique qui en résulte ne modifie pratiquement pas les caractéristiques de fonctionnement.

Il en est tout autrement dans les thyratrons. Un seul électron suffit pour amorcer l'arc. Il est donc essentiel que l'action de l'électrode de contrôle soit absolue.

Ce résultat ne peut être atteint qu'au moyen d'une construction spéciale. Le principe généralement adopté est indiqué sur la figure 31. L'anode qui est un cylindre de graphite est complètement séparée de la cathode par l'électrode de contrôle qui fait office de blindage. On peut voir ici que cette électrode de contrôle n'est plus, à proprement parler une grille. D'autre part, il est également essentiel que l'anode et la cathode soient protégées contre l'action des charges statiques qui peuvent éventuellement se développer sur les parois du tube. La disposition adoptée figure 31 permet d'obtenir ce résultat.

65. — Thyratrons avec tension de commande positive.

Dans de nombreux cas, il est avantageux de pouvoir déclencher l'amorçage au moyen d'une tension positive. C'est pour répondre à cette nécessité qu'on a construit des thyratrons dans lesquels le contrôle exercé sur les faisceaux électroniques est encore plus complet.

Ce résultat peut être obtenu en soustrayant d'une manière presque totale les électrons de la cathode au champ accélérateur de l'anode. L'électrode de commande constitue ainsi un blindage presque complet. Nous indiquons figure 32 une disposition qui peut être adoptée. Entre l'anode et la cathode, l'électrode de contrôle présente une série de cloisons percées de trous d'un diamètre relativement petit.

Dans les thyratrons de ce type on observe que la tension d'amorçage n'est pratiquement plus fonction de la tension d'anode, mais presque exclusivement de la température. Un tel résultat était d'ailleurs facile à prévoir puisque l'influence de la tension d'anode est pratiquement annulée au niveau de la cathode.

Ces tubes à électrode de commande positive ont le grave inconvénient d'avoir un courant de « grille » important avant l'amorçage. En conséquence leur impédance d'entrée est extrêmement faible. Il est impossible de les employer si la tension de commande est fournie par une source à forte impédance. Tel

est le cas — par exemple — où l'on désire commander l'amorçage au moyen d'une cellule photoélectrique.

66. — Thyratrons tétrode, à grille écran, ou à grille blindée.

L'adjonction d'une quatrième électrode permet de conserver l'avantage d'une tension de commande positive, avec, cependant, une impédance d'entrée élevée. De plus, en agissant sur la tension de la quatrième électrode, on peut faire varier le rapport de commande dans de larges limites.

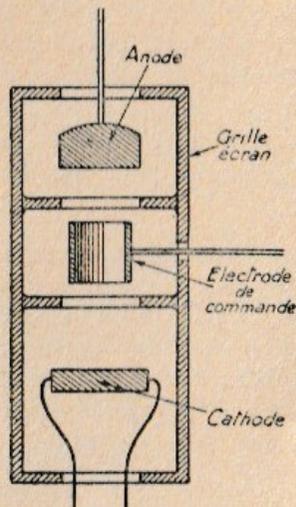
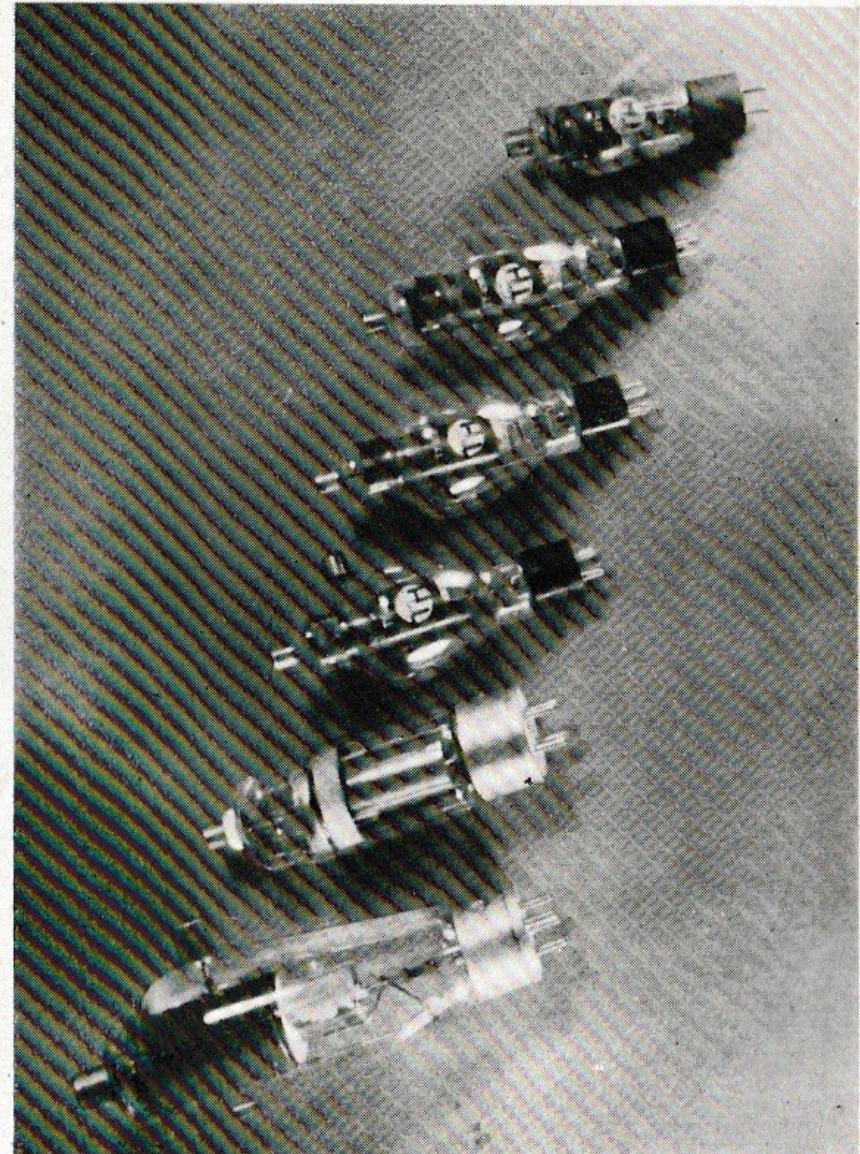


FIG. 33

Un exemple de disposition est donné sur la figure 33. La grille-écran peut être reliée à la cathode ou portée à une tension positive ou négative. L'effet d'une modification de tension est indiquée par le graphique de la figure 34. On voit que, suivant la tension d'écran adoptée, l'éclatement de l'arc peut être déterminé par une tension positive ou négative de l'électrode de commande.

67. — Circuit équivalent à un thyatron.

L'analogie entre tube triode à vide et thyatron est presque purement d'apparence et de forme. Il y a dans les deux cas une cathode, une anode et une électrode de commande. Dans un tube triode utilisé normalement, le courant anodique est une fonction



(Photo THOMSON-HOUSTON)
De gauche à droite : T.H. 6.120, — T.H. 6.220, — T.H. 6.100, — T.H. 6.031 — T.H. 6.050 — T.H. 6.230



(Photo THOMSON-HOUSTON)

Ignitron T.H. 7.030

continue et réversible de la tension de grille. C'est un relais à action progressive, aussi bien dans un sens que dans l'autre. Le tube thyatron est aussi un relais, mais qui fonctionne par

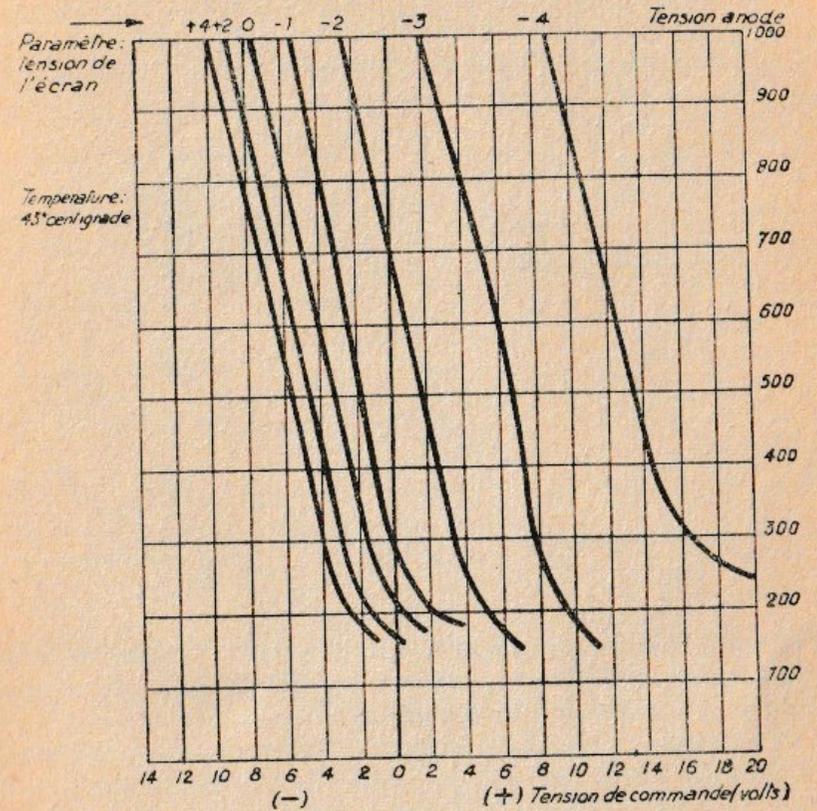


FIG. 34

tout ou rien ; un peu comme un relais électromagnétique dont le contact est ouvert ou fermé. Quand le thyatron est amorcé la chute de tension est indépendante de l'intensité. On peut donc, en première approximation, se le représenter comme un interrupteur en série avec une force contre-électromotrice qui représente la chute de tension interne (Fig. 35). Il y a cependant encore une différence avec cette analogie c'est que le contact demeure fermé. Quand il a été déclenché, le système ne peut plus revenir aux conditions initiales : il n'est pas réversible.

Le thyatron est comparable à un ressort tendu qu'une action faible suffit à libérer. Après quoi, il faut retendre le ressort.

Les conséquences qui résultent de cette propriété sont extrêmement importantes.

S'il est nécessaire de répéter l'opération, il faut interrompre le courant anodique pendant une durée suffisante pour abaisser notablement la densité d'ionisation. Le temps minimum varie avec les modèles de tube et la température. Il est généralement de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} seconde.

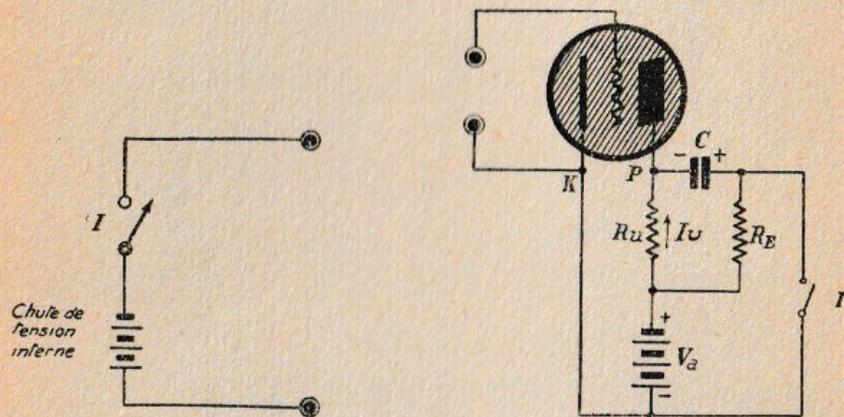


FIG. 35

FIG. 36

Quand le tube est alimenté en courant alternatif à basse fréquence le problème se trouve simplifié puisque le courant anodique s'annule à chaque alternance.

Mais pour certaines applications l'alimentation anodique a lieu nécessairement en courant continu. Un des avantages du thyatron c'est précisément d'être un interrupteur sans contacts solides. Il serait donc parfaitement absurde de prévoir un interrupteur dans le circuit d'anode. Si l'on veut remettre le circuit dans les conditions initiales, il faut avoir recours à des artifices de montage grâce auxquels on peut éteindre le thyatron sans avoir à couper la totalité du courant anodique.

Ces montages sont très nombreux et peuvent se prêter à de multiples variantes. Nous n'indiquerons que les principaux.

68. — Commande par condensateur en parallèle.

Le circuit fondamental est donné sur la figure 36, R_u représente la résistance normale d'utilisation du thyatron, V_a la source continue d'alimentation. Le dispositif d'extinction comporte le condensateur C , la résistance R_E , et l'interrupteur I .

Admettons que le thyatron soit amorcé. La tension entre les extrémités de la charge est égale à V_a , diminuée de la chute de tension interne. En d'autres termes, la tension au point P est celle de la cathode, augmentée de la chute interne qui est inférieure à vingt volts.

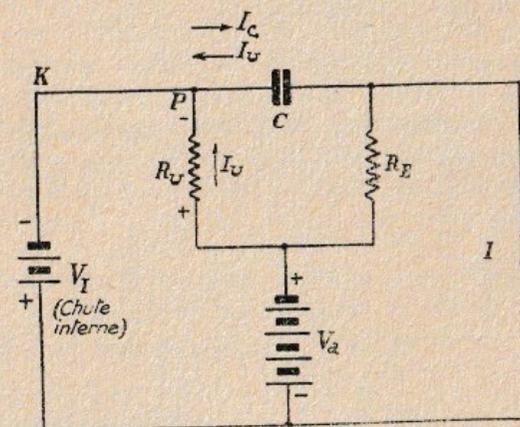


FIG. 37

L'intensité dans R_E est nulle quand le condensateur C est chargé, l'interrupteur I étant ouvert. Il en résulte que le condensateur C est chargé à la tension de V_a diminuée de la chute interne.

Fermons l'interrupteur I . Le schéma équivalent de la figure 37 nous permet de mieux comprendre la suite des événements. Le condensateur C se décharge à travers le thyatron, mais le courant de décharge est de sens contraire au courant normal. Si la valeur de crête de ce courant peut atteindre l'intensité normale I_u fournie par le thyatron, il y a annulation de courant dans l'espace cathode-anode. En conséquence, l'arc s'éteint. Le condensateur ne peut rendre l'anode négative que pendant un certain temps parce qu'une fraction du courant de décharge passe par R_u . Le condensateur, après s'être déchargé se charge en sens inverse. Il faut évidemment une valeur de capacité d'autant plus grande que l'intensité normale I_u et plus élevée et que R_u est plus faible. Si le courant du thyatron n'était pas maintenu nul pendant assez longtemps, la désionisation n'aurait pas lieu et le thyatron ne serait pas désamorçé.

La résistance R_E a pour fonction d'éviter la mise en court circuit de la source V_a quand on ferme l'interrupteur. Elle doit être assez faible pour permettre la charge complète de C entre deux manœuvres successives de I .

69. — Réalisation de l'interrupteur.

On notera que l'interrupteur I est beaucoup plus facile à réaliser que s'il s'agissait de couper directement le courant I_u . Il ne s'agit pas d'*interrompre* un courant continu intense (ce qui se traduirait par un arc, qu'il y aurait lieu de « souffler » par un moyen quelconque). Il s'agit d'établir un court-circuit et les contacts ne sont traversés par le courant que pendant quelques millisecondes.

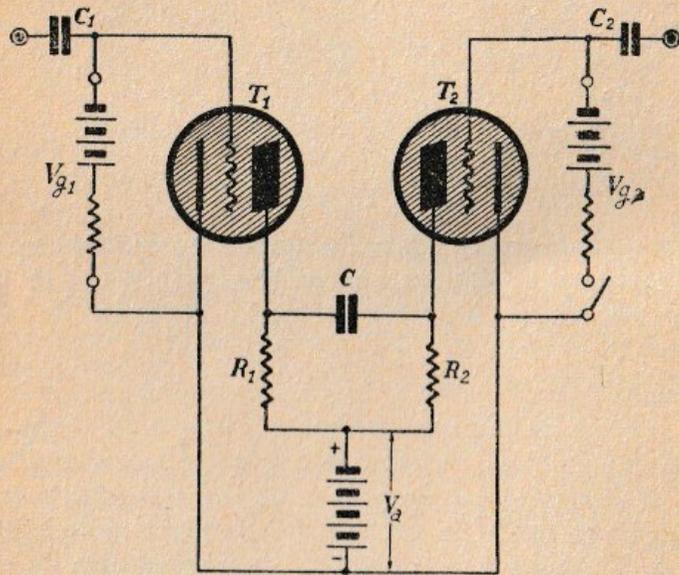


FIG. 38

D'ailleurs, on peut éventuellement remplacer I par un tube à cathode froide et l'on peut ainsi obtenir des oscillations de relaxation, ou commander le thyatron en agissant sur une électrode de commande.

On peut aussi utiliser un autre thyatron et l'on obtient de la sorte un circuit particulièrement intéressant (Fig. 38).

Supposons que T_1 soit amorcé et T_2 éteint.

Nous retrouvons exactement les conditions étudiées figure 36 quand l'interrupteur I est ouvert. La résistance R_2 n'est traversée par aucun courant. Une impulsion positive sur la grille de T_2 provoque son amorçage. C'est l'équivalent de la fermeture de I sur les figures 36 et 37. Le courant de T_1 s'annule et le tube désamorce si la tension de grille est convenable. Le condensateur appelé condensateur de commutation est maintenant chargé en sens inverse. Le tube T_2 a pris la place de T_1 . Une impulsion positive sur la grille de T_1 amènera le retour aux conditions initiales.

On peut, sans inconvénient, monter les deux grilles en parallèle : l'impulsion positive n'ayant aucune action sur le tube qui est amorcé. Le circuit est un *Trigger* ou une *bascule*. Nous en examinerons les applications plus loin.

70. — Variante du montage.

Nous donnons figure 39 une variante du même montage. Les résistances de charge et le condensateur de commutation sont disposés dans le circuit de cathode. Le fonctionnement est pratiquement le même.

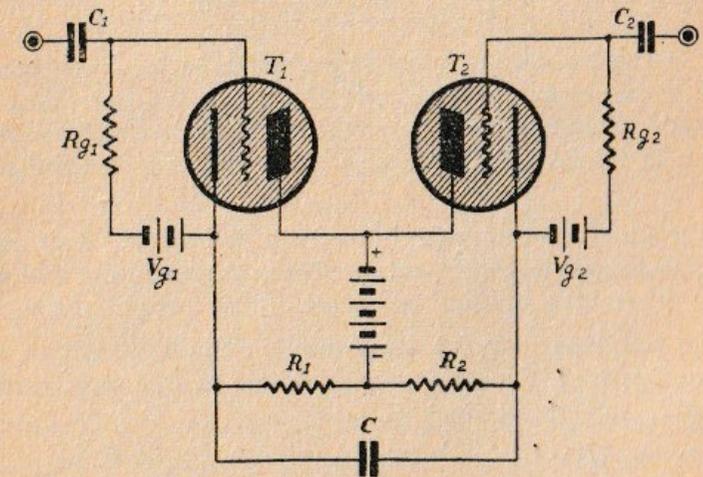


FIG. 39

71. — Commande par condensateur en série.

Le circuit fondamental est indiqué sur la figure 40. Le circuit anodique du condensateur est coupé par un condensateur C . Par suite de l'existence d'une très faible capacité entre cathode et plaque, la totalité de la tension apparaît pratiquement entre plaque et cathode.

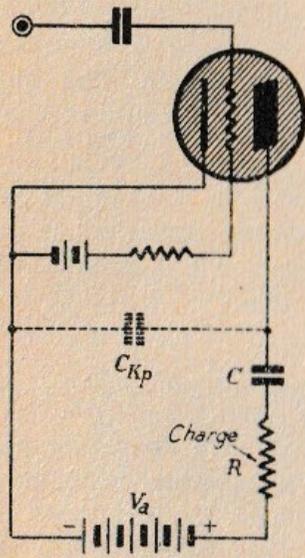


FIG. 40

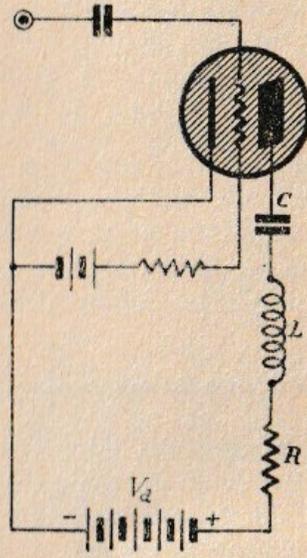


FIG. 41

Si la tension de grille est convenable, le tube amorce. Mais à mesure que le condensateur se charge, la tension entre anode et cathode diminue. Le tube s'éteint quand le condensateur est chargé à la tension V_a , diminuée de la chute de tension dans le tube.

Pour que le tube puisse amorcer à nouveau, il faut naturellement décharger le condensateur. Nous verrons plus loin que ce résultat peut être obtenu au moyen d'un second thyatron.

Une variante souvent employée du montage figure 40 est indiquée figure 41. En série avec la charge R et le condensateur C est montée une inductance L .

Si la charge R a une valeur inférieure à $\sqrt{\frac{4L}{C}}$ le condensateur se charge à une tension pratiquement double de la tension

d'alimentation. Le diagramme en fonction du temps est indiqué figure 42. La partie pointillée n'existerait qu'en l'absence du thyatron. En effet, le courant anodique ne peut pas s'inverser et, par conséquent, la charge s'interrompt au point C qui correspond pratiquement à $2V_a$.

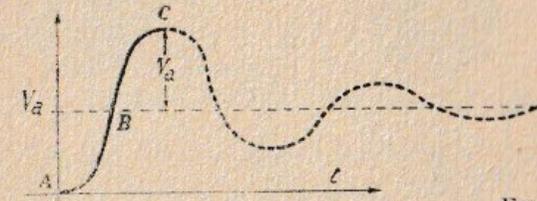


FIG. 42

72. — Emploi d'un thyatron de décharge.

Le croquis de la figure 43 n'est qu'un schéma de principe dont la réalisation pratique serait extrêmement dangereuse. En cas d'amorçage simultané, les deux thyatrons en série avec la source à haute tension constituent un circuit fermé. Il y a donc un court circuit et destruction instantanée des deux tubes.

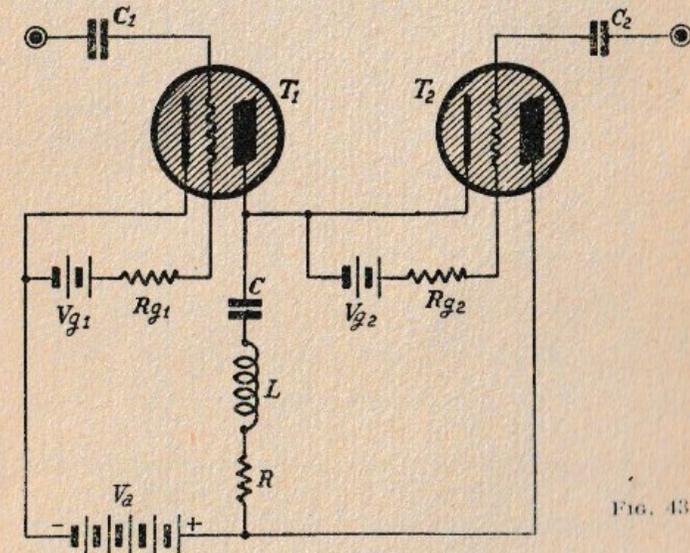


FIG. 43

On peut conserver le principe tout en supprimant le risque du court circuit. C'est ce que permet le montage figure 44. L'inductance est fractionnée en deux parties égales bobinées dans le même sens sur un même circuit magnétique. Cette inductance agit comme un auto transformateur. Quand un tube amorce,

la tension induite dans l'inductance annule la tension plaque de l'autre tube et en provoque automatiquement l'extinction.

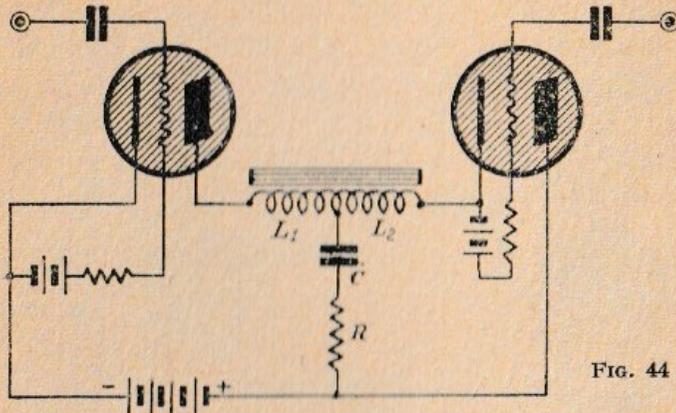


Fig. 44

CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPAUX THYRATRONS

THYRATRONS

Type	Chauffage		Température du mercure	Tension (volts)		Intensité (ampères)			Constructeur	Autres dénominations
	Volts	Ampères		Anode (pointe)	inverse (pointe)	Pointe	Moyenne	Surcharge		
Triodes à vapeur de mercure										
3C43	2,5	7	25 à 70	1250	1250	6	1,5	120	RCA	
627	2,5	6	40 à 80	1250	2500	2,5	0,64	25	"	3000-0,6 Verr. Sc. (1)
676	5	30	40 à 80	750	750	77	2,5	200	"	
677	5	30	30 à 30	10 000	10 000	15	4	16	"	
5557									RCA	
TY6011	2,5	5	40 à 80°	2500	5000	2	0,5	40	Thomson	
5559									RCA	
TY6031	5	4,5	"	1000	1000	15	2,5	200	Thomson	
VRC	5	7,5	40 à 80	1000	1000	30	3	200	SFR	
3 - 1000										
VIC	5	7,5	15 à 80	1500	1500	30	3	200	SFR	
3 - 1500										
3000-3,5	5	8	10 à 50°	1500	3000	35	3,5	-	Verr. Sc.	
3800 A	5	10	25 à 65°	15000	16000	5	1,25	-	LCT	
3801 A	5	20	25 à 65°	20000	20000	20	2,5	-	LCT	
3802 A	5	40	25 à 65°	20000	20000	20	7,5	-	LCT	
1500 -										
12,5	2,5	26	10 à 45°	900	1500	125	12,5	-	Verr. Sc.	
3803 A	5	100	25 à 60°	16000	16000	50	20	-	LCT	
5563	5	10	25 à 50	15 000	15 000	6,4	1,6	200	RCA	
				10 000	10 000	10	1,8	200		
TY6030	5	4,5	35 à 80	1000	1000	15	2,5	200	Thomson	
TY6070	5	17,5	20 à 40°	12 500	12 500	75	12,5	1500	"	
TY6090	5	17,5		17 000	17 000	75	12,5	5000	"	
PL17	2,5	5	40 à 80°	2500	5000	2	0,5		Philips	RL17 Dario
PL57	5	4,5	40 à 80	1000	1000	15	2,5		"	RL57 Dario
PL150	1,92	35	40 à 80	240	500	90	15		"	RL150 Dario

(1) - 10 à + 50°.

THYRATRONS (Suite)

Type	Chauffage		Température du mercure	Tension (volts)		Intensité (ampères)		Constructeur	Autres dénominations	
	Volts	Ampères		Anode (pointe)	inverse (pointe)	Pointe	Moyenne			
Triodes à gaz										
629	2,5	2,6		350	350	0,2	0,64	2	RCA	
884	6,3	0,6		350	350	0,13	0,075		VISSEUX	
TH6020 (xenar)	2,5	21		1500	1500	80	6,4	1120	Thomson	
TH6030 (argent mercure)	2,5	7		1250	1250	6	3	120	"	
EC50	6,4	2,5		1000	1000	0,75	0,01	-	Dario	
RL 5544	2,5	12	-55 + 80°	1500	1500	40	3,2	-	Dario	
885	2,5	1,4		350	350	0,3	0,075		Visseaux	
Téetrodes à vapeur de mercure										
105	5	10	40 à 80°	2500	2500	40	6,4	400	RCA	
			(service intermittent) 25 à 50°	10 000	10 000	16	4	160	"	
172	5	10	40 à 80°	2500	2500	40	6,4	400	RCA	
672A	5	5	40 à 80°	2500	2500	40	3,2	150	RCA	
PL105	5	10	40 à 80	1000	1000	15	2,5	200	Philips	RL105 Dario
TH6100	5	4,5	40 à 80	1000	1000	15	2,5	200	Thomson	
GL5560										
TH6120	5	10	40 à 80	1000	1000	40	6,4	400	Thomson	
3000 -	5	8	10 à 50°	1500	3000	35	3,5	-	Verr.Sc.	
3,5										
3800A	5	10	25 à 65°	15000	16000	5	1,25	-	LCT	
3801A	5	20	25 à 65°	20000	20000	10	2,5	-	LCT	
3802A	5	40	25 à 65°	20000	20000	20	7,5	-	LCT	
1500 -	2,5	26	10 à 45°	900	1500	125	12,5	-	Verr.Sc.	
12,5										
3803A	5	100	25 à 60°	16000	16000	50	20	-	LCT	
Téetrodes à gaz										
2D21	6,3	0,6	-75 + 90	650	1300	0,5	0,1	10	SFR-RCA	RL21 Dario
									MAZDA	
									Westinghouse	
3D22	6,3	2,6	"	650	1500	8	0,8	30	RCA	3870-A LCT
									Westinghouse	
502A	6,3	0,6	-55 + 90	650	1300	1	0,1	10	RCA	
									Westinghouse	
2050	6,3	0,6	-35 + 90	650	1300	1	0,1	10	RCA	
									Mazda	
5096	6,3	0,15	-55 + 90	500	500	0,1	0,025	2	RCA	
PL21	6,3	0,6		650	1300	0,5	0,1		Philips	
PL1607 (pentode)	2	2,6		700	700	2	0,5		Philips	RL1607 Dario
3868A	2,5	12	-40 à +80	1500	1500	25	3	-	LCT	
3866A	3	28	-40 à +80	1000	1000	40	5	-	LCT	

CHAPITRE VII

PRODUCTION D'OSCILLATIONS au moyen des Thyratrons

73. — Généralités.

Les tubes thyratrons peuvent être utilisés pour produire des oscillations entretenues. Une première application est la production des oscillations de relaxation destinées aux bases de temps des tubes à rayons cathodiques, soit en télévision, soit pour l'oscillographie. Dans ce cas la puissance mise en jeu est faible. On peut alors employer des thyratrons de petite puissance. La question du rendement est sans importance.

Une autre application est la transformation du courant continu en courant alternatif. On a généralement besoin d'une puissance déterminée et il faut avoir recours à des thyratrons de grande puissance. Il faut alors obtenir un rendement aussi bon que possible.

Nous étudierons successivement les deux cas.

74. — Oscillations de relaxation.

Le montage généralement utilisé est la transposition du circuit donné figure 13 pour un tube luminescent. Les circuits peuvent, d'ailleurs être disposés de plusieurs manières.

Considérons par exemple le circuit fondamental de la figure 45.

Le condensateur C se charge à travers la résistance R et, en conséquence la tension entre cathode et anode croît suivant la courbe AB . En B , le thyatron amorce et le condensateur se décharge d'une manière pratiquement instantanée. La tension passe de B en C . Le tube se désamorce et le condensateur se charge de nouveau. On obtient ainsi des tensions de relaxation.

Avec un tube luminescent, l'amplitude maximum est la différence entre tension d'amorçage et d'extinction, c'est-à-dire,

en général, une trentaine de volts. En employant un thyatron, la tension d'amorçage est variable à volonté en agissant sur la tension de grille commandée par le potentiomètre P_1 .

Si la grille est rendue plus négative, ou moins positive, l'amorçage a lieu, par exemple au point B' .

La fréquence est fonction de la constante de temps CR du circuit de charge. On peut donc la modifier en agissant soit sur C , soit sur R .

Le système est facilement synchronisé sur un phénomène extérieur au moyen d'une tension périodique transmise à la grille par l'intermédiaire du condensateur Cg ou par tout autre moyen.

Le maximum de tension disponible de crête correspond évidemment à la tension V , diminuée de la tension d'extinction qui est généralement de quelques volts.

75. — Limites de fréquence.

Du côté des fréquences basses, il n'y a pratiquement pas de limite. On peut descendre sans difficulté à des périodes de plusieurs secondes.

Du côté des fréquences élevées une limite est imposée par le temps de désionisation. Il faut naturellement que la grille reprenne son pouvoir de contrôle. Cette durée varie dans de larges limites avec la nature du gaz ou de la vapeur. Avec certains modèles de thyratrons et en prenant des précautions particulières pour éviter les capacités parasites, il est possible d'atteindre des fréquences de l'ordre de 100 000 périodes/seconde.

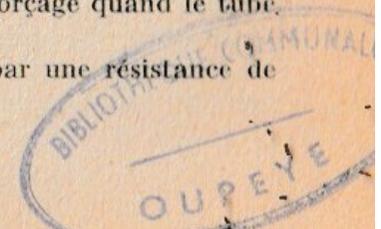
76. — Protection du thyatron.

Avec le montage de la figure 45, le thyatron serait rapidement détérioré car le courant de pointe atteindrait des valeurs excessives, en particulier, quand il s'agit de fréquences basses.

Il faut ajouter au montage des dispositifs limitant le courant maximum d'anode et de grille. On peut employer soit des résistances, soit des bobines de self induction. On préfère souvent le premier procédé, parce qu'il est plus simple.

Une résistance de 500 à 1 000 ohms dans le circuit de plaque suffit généralement à limiter la pointe d'amorçage quand le tube est alimenté sous 400 volts maximum.

La protection de la grille est assurée par une résistance de 25 000 ohms.



Un circuit complet est indiqué sur la figure 47, avec indication des différentes valeurs. Les capacités C sont mises en service au moyen d'un commutateur.

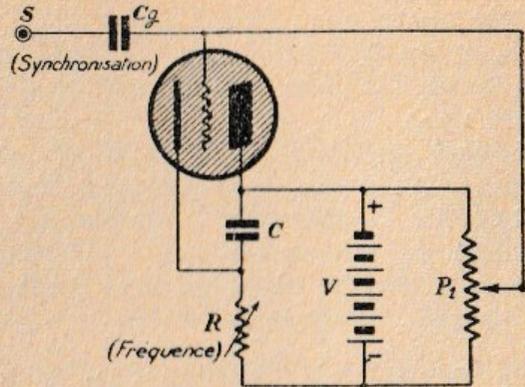


FIG. 45

Le potentiomètre P placé dans le circuit de grille sert à régler la synchronisation. La tension ainsi introduite doit être aussi faible que possible.

Il est à noter que le réglage d'amplitude réagit nécessairement sur la fréquence produite. Pour l'expliquer, il suffit de consulter

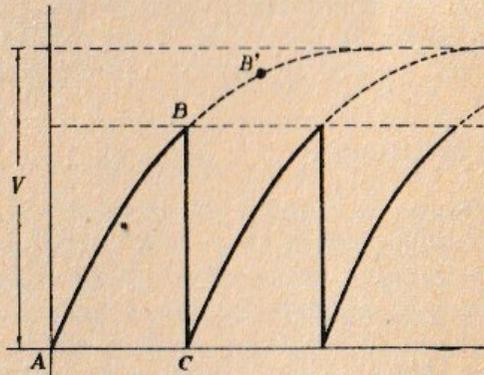


FIG. 46

la figure 46. Modifier l'amplitude c'est faire amorcer le tube plus tôt ou plus tard, c'est donc nécessairement agir sur la *période*. De la même manière, le réglage de fréquence a une action sur l'amplitude de la tension produite.

La résistance placée dans le circuit de plaque réduit la vitesse de décharge du condensateur. Elle intervient donc aussi pour limiter la fréquence supérieure produite.

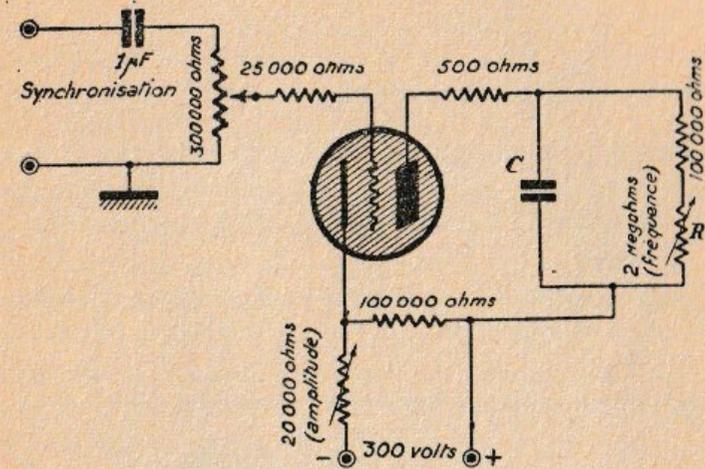


FIG. 47

77. — Production d'une tension en dents de scie linéaire.

Les « dents de scie » produites sont délimitées par des branches de courbe exponentielle, puisqu'il s'agit de la variation de tension d'un condensateur qui se charge sous une *tension* constante, à travers une résistance ohmique.

Il est facile de déterminer la condition nécessaire pour que la variation de tension en fonction du temps sont exactement linéaire.

Cette tension est :

$$V = \frac{Q}{C}$$

Q étant la quantité d'électricité emmagasinée.

Une variation dV correspond à :

$$\frac{dQ}{C}$$

Cette variation doit être constante en fonction du temps. Il faut donc obtenir que :

$$\frac{dQ}{dt} \times \frac{1}{C} \text{ soit constant.}$$

Mais $\frac{dQ}{dt}$ c'est l'intensité I dans l'intervalle dt .

En conséquence, le condensateur doit être chargé à *intensité constante*.

78. — Systèmes à intensité constante.

On peut obtenir le résultat cherché de différentes manières. Par exemple, un tube diode à filament de tungstène pur, travaillant à la saturation fournit une intensité indépendante de la tension appliquée.

Mais cette intensité est relativement faible : le rendement électronique du filament de tungstène pur n'étant pas très élevé.

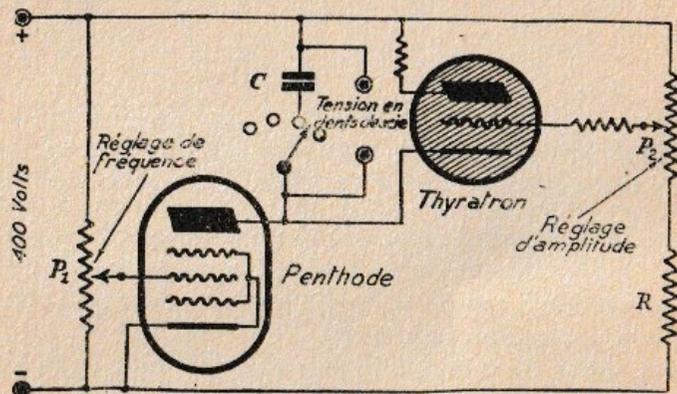


FIG. 48

On préfère généralement employer un tube penthode dont la caractéristique intensité-tension est pratiquement horizontale sur une large étendue. Un montage de principe est donné sur la figure 48.

Le condensateur C se charge à travers le tube penthode. L'intensité de charge peut être modifiée au moyen de P , agissant sur la tension d'écran. Ainsi le tube penthode se comporte comme une résistance variable, remplaçant R dans le schéma figure 47. C'est le réglage fin de fréquence. La commutation de gamme est obtenue en changeant le condensateur C .

La tension d'amorçage du thyatron est réglée au moyen de P_2 .

Transformation du courant continu en courant alternatif

79. — Généralités.

Les thyratrons permettent la transformation du courant continu en courant alternatif ainsi que la transformation inverse, par des moyens entièrement électroniques, c'est-à-dire sans organes mécaniques en mouvement.

Ainsi peuvent être résolus certains problèmes techniques particuliers, comme, par exemple, la transformation d'un courant alternatif d'une certaine fréquence en un courant alternatif d'une autre fréquence, ou encore, la transformation du courant continu à basse tension en courant continu haute tension.

Pour des puissances moyennes, les rendements que l'on peut obtenir sont au moins aussi élevés qu'en employant des machines tournantes.

Ce rendement est, en principe, d'autant plus élevé qu'on travaille à plus haute tension car la chute de tension dans le tube devient négligeable par rapport à la tension utile.

Nous étudierons, pour commencer, les montages permettant d'obtenir du courant alternatif à partir de courant continu.

Ces montages sont des adaptations directes des schémas dont nous avons expliqué le fonctionnement plus haut : contrôle par condensateur série, par condensateur parallèle, etc...

Le chauffage des cathodes constitue un problème important. En effet, la tension de chauffage prévue doit être inférieure à la tension minimum d'ionisation de l'atmosphère interne : en pratique, elle est donc de quelques volts. Si l'on emprunte cette tension à la source continue on est ainsi dans l'obligation de produire une chute de tension importante d'où diminution du rendement.

Un moyen meilleur consiste à assurer la mise en route au moyen d'un chauffage sous courant continu ; après quoi, les thyratrons sont chauffés par le courant alternatif qu'ils produisent. Ce système n'est cependant pas sans inconvénient : en cas d'un défaut de fonctionnement, le chauffage n'est plus assuré normalement ce qui peut occasionner une détérioration grave ou même la mise hors service des thyratrons. Ajoutons toutefois qu'il est toujours possible d'adjoindre des dispositifs de sécurité.

80. — Emploi d'un seul thyatron.

Nous avons reconnu plus haut qu'il était possible de produire des tensions périodiques par le moyen d'un thyatron. Les tensions en dents de scie ainsi obtenues sont des courants alternatifs d'une forme particulière. Pour l'utilisation industrielle, il y a évidemment des inconvénients à employer des tensions présentant un grand nombre d'harmoniques : il faut, au contraire, chercher à s'approcher le plus possible de la forme sinusoïdale.

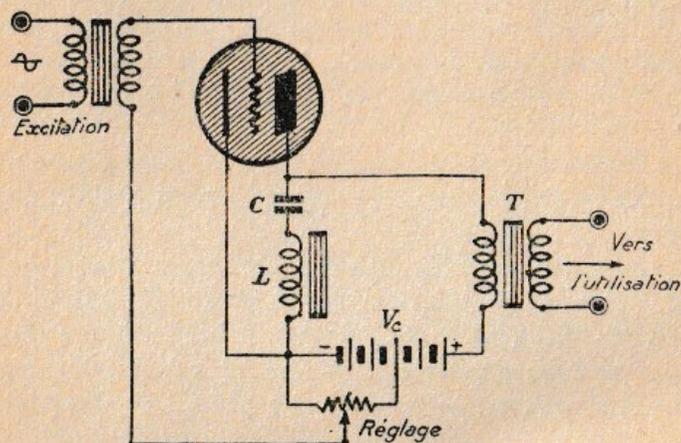
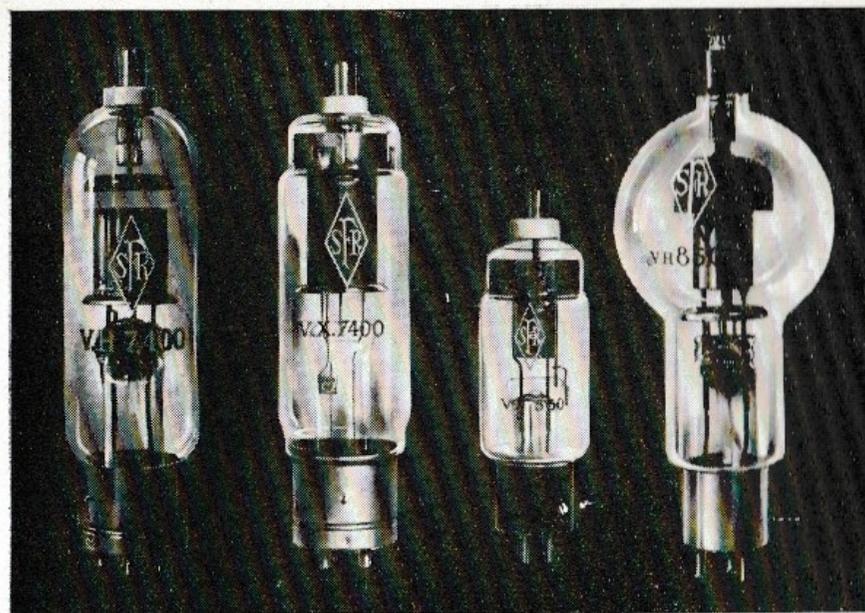


Fig. 49

Un exemple de circuit avec excitation extérieure est donné sur la figure 49. Le fonctionnement est le suivant : Le condensateur C se charge à travers L et le circuit primaire du transformateur T .

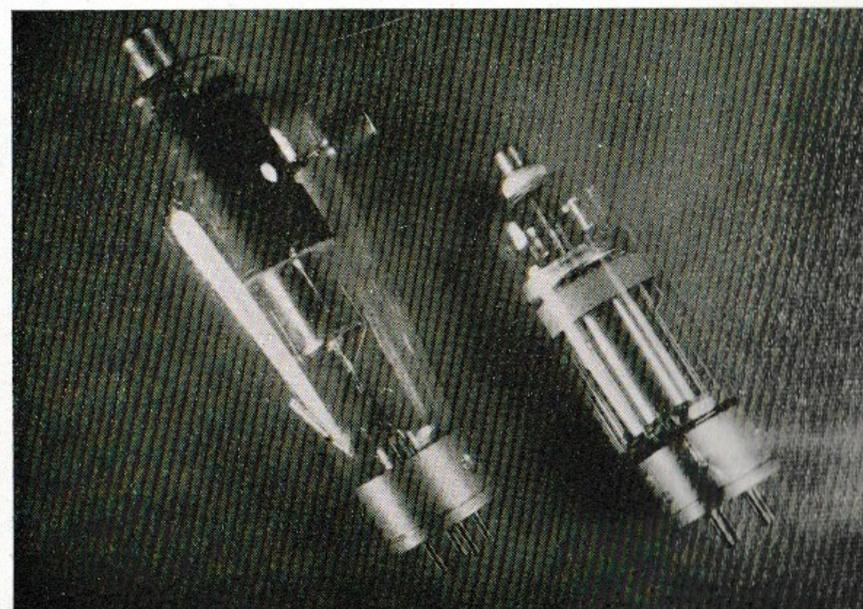
Ainsi la tension appliquée à l'anode croît jusqu'à la valeur d'amorçage. Celle-ci peut, d'ailleurs être plus élevée que la tension continue V_c , parce que la charge du condensateur peut être oscillante. Quand l'amorçage se produit, la tension anodique effective peut devenir nulle, si les éléments sont bien déterminés.

Le tube désamorçage et le même cycle peut recommencer. La tension d'excitation est, en fait, une tension de synchronisation qui permet de régler exactement le moment de l'amorçage. Grâce aux impulsions transmises à la grille, la fréquence produite est indépendante de la charge.



(Photo S. F. R.)

De gauche à droite : Valve à vapeur de mercure VH 7400. — Valve à gaz rare VX 7400. — Valve à gaz rare VX 550. — Valve à vapeur de mercure ; toutes de la Société Française Radioélectrique.



(Photos THOMSON-HOUSTON)

T.H. 6.120. — T.H. 6.220

81. — Montage à auto excitation (Blocking-Oscillator, fig. 50).

On peut obtenir un fonctionnement beaucoup moins critique en transposant exactement un schéma d'oscillateur auto-entretenu. Cette transposition n'est d'ailleurs que d'apparence, parce que le circuit fonctionne comme un générateur de tension de relaxation à blocage (blocking-oscillateur) et non pas comme un générateur à circuit accordé.

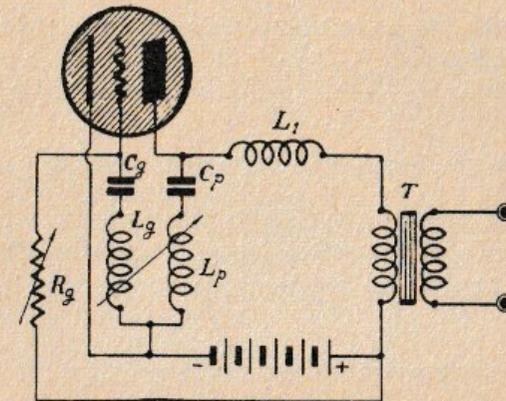
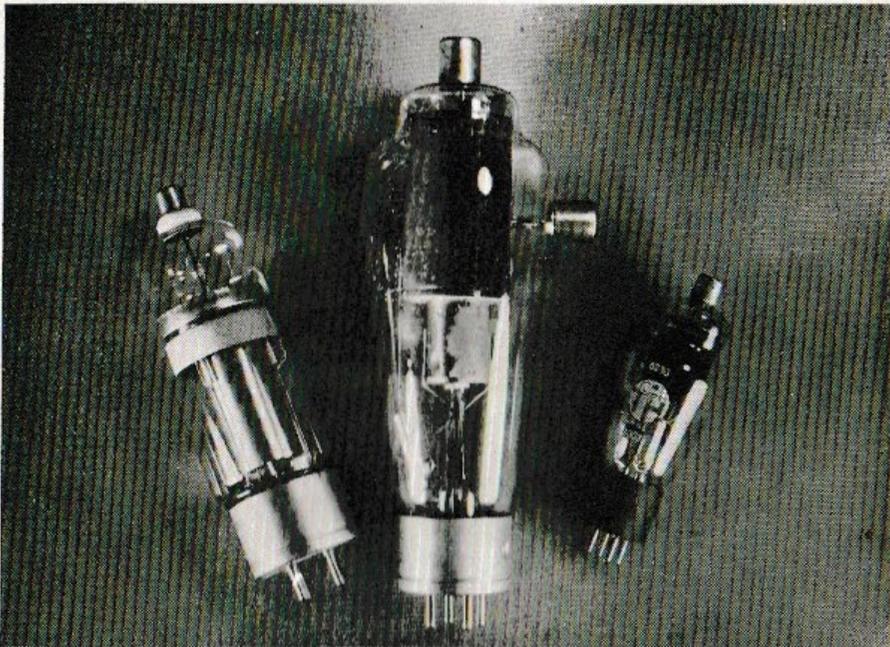


FIG. 50

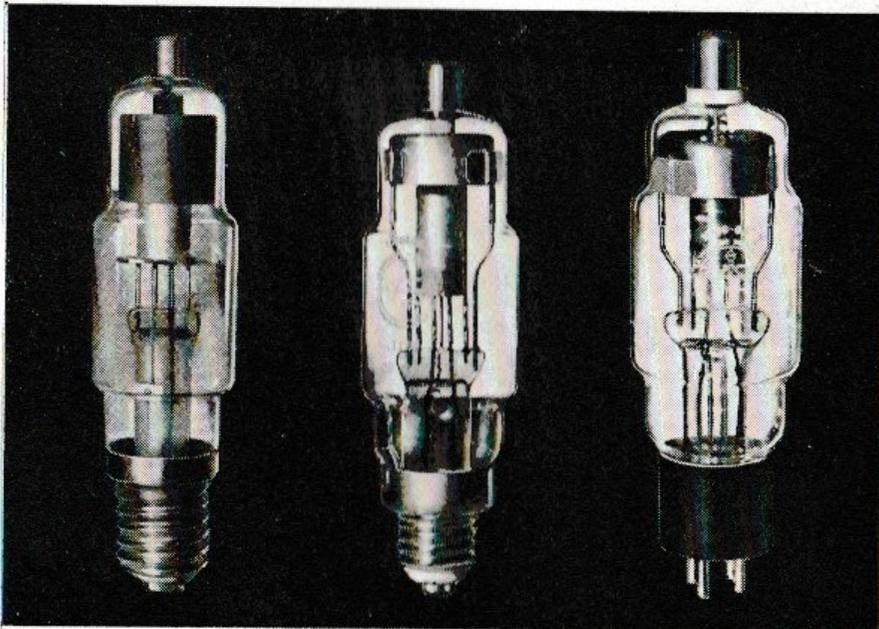
Nous donnons un exemple de schéma figure 50. Le fonctionnement s'explique de la manière suivante. Le condensateur C_p se charge très rapidement à travers L_p . Le thyatron amorce. La décharge oscillante, à travers L_p amène la tension anodique à une valeur nulle ou même négative. La bobine L_1 a pour effet d'empêcher la décharge à travers le primaire du transformateur. Le brusque courant de décharge dans L_p induit une tension négative importante sur la grille. Dans ces conditions : tension anodique nulle, tension grille très négative, le tube s'éteint. Le condensateur C_g ne peut se décharger qu'à travers R_g , ce qui ne peut se faire très rapidement.

La durée de l'opération dépend du produit $R.C$. Pendant que la tension de grille remonte vers les valeurs positives, il en est de même de la tension de plaque. Il arrive donc un instant où le tube amorce de nouveau. Le cycle se poursuit ainsi indéfiniment.

Le fonctionnement n'est stable que pour un couplage très serré des bobines L_p et L_g . De plus, ces bobinages doivent présenter



De gauche à droite : T.H. 6.220. — T.H. 6.120. — T.H. 6.230



(Photo VERRERIE SCIENTIFIQUE)

De gauche à droite : Valve à vapeur de mercure 12000 V — 1,25 A. — Valve à gaz rare 7500 V — 0,6 X (0,6 ampère), — Valve à gaz rare 10 000 V — 0,25 X (0,25 ampère), de la Sté La Verrerie Scientifique.

des pertes en haute fréquence aussi réduites que possible. Il faut donc les réaliser au moyen de circuits magnétiques en fer divisé ou en ferrite.

Pour un fonctionnement sur 50 c/s, on pourra adopter les valeurs suivantes :

$$R_g = 50\ 000\ \text{ohms}$$

$$C_g = 0,1\ \mu F$$

$$C_p = 40\ \mu F$$

$L_p = 1,5$ millihenrys, avec une résistance inférieure à $0,2$ ohm.

$L_g = 2,5$ millihenrys.

On peut régler la fréquence produite en agissant sur R_g .

82. — Convertisseurs symétriques. Circuit à contrôle parallèle.

Un montage comme celui de la figure 50 ne fournit pas une tension sinusoïdale. Il y a nécessairement une variation de courant beaucoup plus rapide au moment de l'amorçage du thyatron

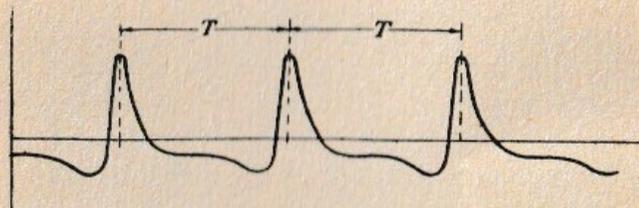


FIG. 51

qu'au moment de la charge du condensateur. La forme de l'oscillation est ainsi nécessairement asymétrique. Elle aura, par exemple, la forme indiquée figure 51. Il est facile de prévoir que la forme peut être notablement améliorée quand on emploie deux thyratrons travaillant symétriquement.

Un exemple de montage de ce type est donné figure 52, c'est la transposition du montage étudié plus haut, avec commande des tubes par condensateurs en parallèle.

Par l'intermédiaire d'un transformateur T_1 , dont l'enroulement secondaire est à prise médiane, les deux thyratrons reçoivent des tensions d'excitation déphasées de 180° , c'est-à-dire qu'une grille est positive quand l'autre est négative.

A la mise en route, le thyatron I dont la grille est positive amorce, l'autre est éteint. Après la première demi-période du

courant d'excitation, le thyatron II amorce à son tour. Mais la brusque décharge du condensateur de commutation C annule pendant un instant la tension anodique effectivement appliquée sur I ; dont la grille est alors négative. En conséquence, il s'éteint.

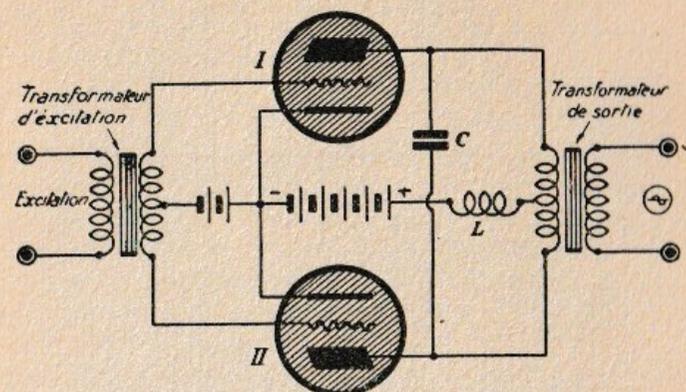


FIG. 52

Le fonctionnement correct dépend essentiellement du choix judicieux du condensateur de commutation et de la nature de la charge imposée aux tubes. Le schéma équivalent est indiqué figure 53. On voit qu'il est identique à celui d'un vibreur transformant du courant continu en courant alternatif.

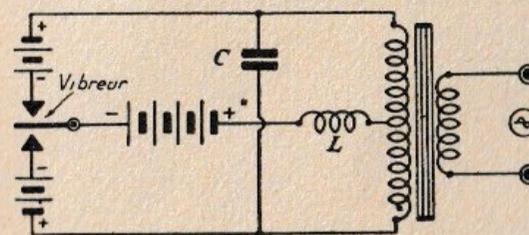


FIG. 53

83. — Montages à auto-excitation.

On peut transposer le montage précédent de différentes manières pour qu'il soit auto-excité.

Un premier moyen qui vient à l'esprit consiste à emprunter directement la tension produite à la tension de sortie. Mais il faut naturellement respecter la condition de phase correcte. Ce

résultat peut être obtenu au moyen d'un ensemble résistance-capacité. On arrive ainsi au circuit indiqué figure 54.

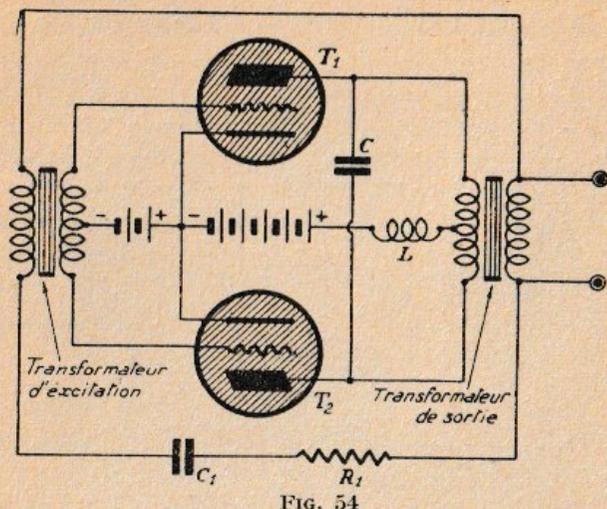


FIG. 54

Le groupe R_1C_1 permet de régler le déphasage. La fréquence est déterminée par la grandeur des différents condensateurs et les constantes des transformateurs.

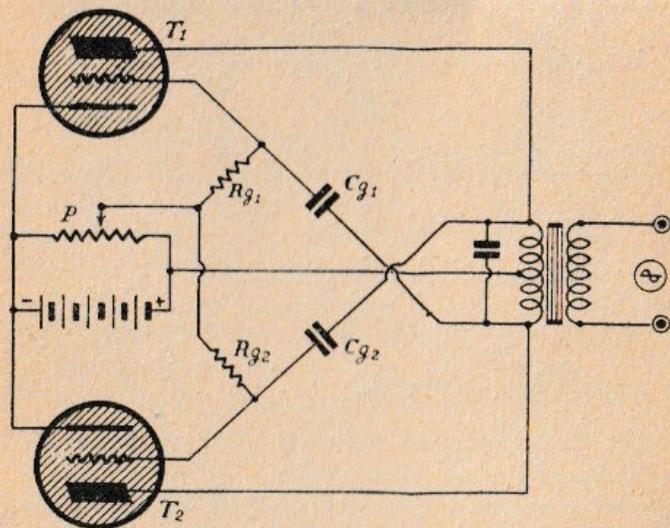


FIG. 55

Un autre montage dont le fonctionnement est comparable à celui de la figure 50 est donné figure 55.

Le circuit de grille d'un tube est couplé avec le circuit de plaque de l'autre au moyen d'un condensateur. La tension de grille est fixée par une résistance relativement élevée et la tension moyenne est réglée par un potentiomètre P branché en parallèle sur la tension d'alimentation.

Grâce à la présence d'un condensateur de commutation placé entre les deux anodes, l'amorçage d'un tube éteint l'autre par annulation de la tension d'anode et porte la grille à une tension négative. Le condensateur de grille se décharge à travers la résistance de grille. Quand les conditions d'amorçage sont atteintes, l'allumage du tube provoque l'extinction de l'autre. C'est la constante de temps du circuit de grille qui détermine la fréquence.

84. — Circuits avec thyatrons en série.

On peut aussi réaliser différentes combinaisons dans lesquelles les tubes thyatrons sont montés en série au lieu d'être disposés

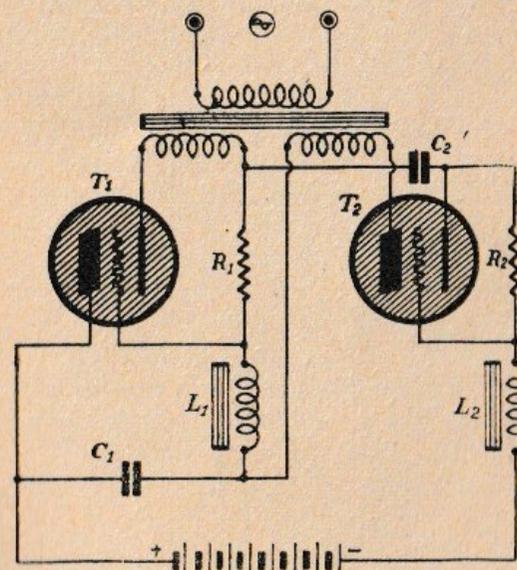


FIG. 56

en parallèle. Dans ce cas aussi les tensions d'excitation peuvent être fournies par une source, séparées ou être empruntées au circuit

de sortie, en respectant la condition de phase voulue. La commutation est plus délicate à obtenir que dans les montages précédents.

À titre documentaire, nous donnons sur la figure 56, le schéma d'un montage série auto-excité. Le fonctionnement s'explique sans difficulté en se reportant aux indications données précédemment.

Il est très difficile de maintenir la fréquence constante quand la puissance fournie varie.

CHAPITRE VIII

LE THYRATRON COMME REDRESSEUR

85. — Généralités.

L'emploi d'une électrode de commande dans un tube redresseur peut surprendre. On peut, à priori, n'en pas apercevoir l'intérêt. Mais, en réalité, il est énorme. L'électrode de commande permet de faire varier la puissance redressée, *sans introduire de pertes*.

En courant continu, pour limiter l'intensité de courant, ou pour modifier la puissance, on introduit des résistances en série. Mais l'énergie absorbée est alors perdue, sans compter que l'évacuation de cette puissance peut être un problème difficile à résoudre.

En courant alternatif, on emploie des inductances. Les pertes par effet Joule sont alors partiellement évitées. Mais le facteur de puissance devient mauvais. La puissance déwattée ainsi créée n'est pas gratuite. Dans les installations un peu importantes, le fournisseur d'électricité a prévu un *compteur sinus*... pour facturer la puissance réactive...

Cette possibilité de régulation peut être combinée avec la fonction de redressement. Ainsi, les thyratrons permettent d'obtenir le fonctionnement des moteurs à courant continu sur un réseau alternatif en conservant tous leurs avantages et, même, en leur en ajoutant de nouveaux.

86. — Caractéristique d'amorçage en courant alternatif.

Appliquons une tension alternative à l'anode d'un tube thyatron. L'amorçage ne peut évidemment se produire que pendant les alternances positives, comme *ABC, EFG*, etc.. (Fig. 57). Encore faut-il pour cela que la tension appliquée à l'électrode de contrôle ne soit pas exagérément négative.

A chaque valeur de la tension instantanée positive d'anode correspond une valeur limite, positive ou négative, de la tension de commande pour laquelle se produit l'amorçage de l'arc. On peut tracer un diagramme comme nous l'avons fait sur la figure 57. On obtient ainsi une branche de courbe comme KLM , pour chaque alternance positive.

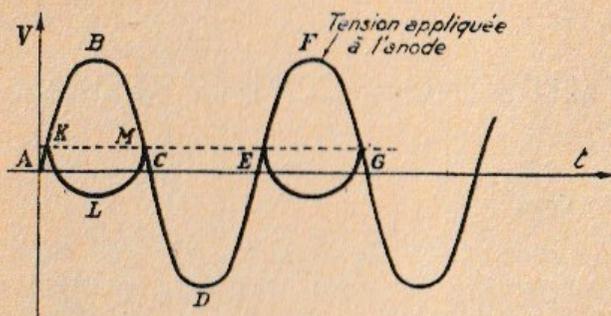


FIG. 57

La signification d'un tel diagramme est facile à comprendre. Pour chaque tension de grille correspondant à un point situé au-dessus, de la caractéristique de grille comme le point S par

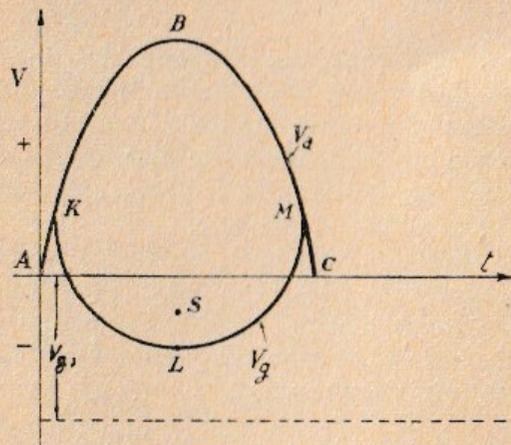


FIG. 58

exemple, le thyatron s'allume (Fig. 58). Quand l'arc est amorcé, il le demeure jusqu'au moment où la tension anodique devient inférieure à la tension d'extinction, c'est-à-dire pratiquement jusqu'à la fin de l'alternance positive.

87. — Commande par tension continue.

Réalisons le montage de la figure 59. On applique une tension alternative sur l'anode du thyatron. La tension de commande est fournie par une source continue de valeur V_{g1} . On peut faire varier la tension de commande au moyen d'un potentiomètre P .

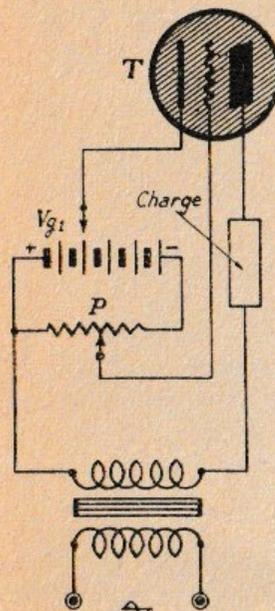


FIG. 59

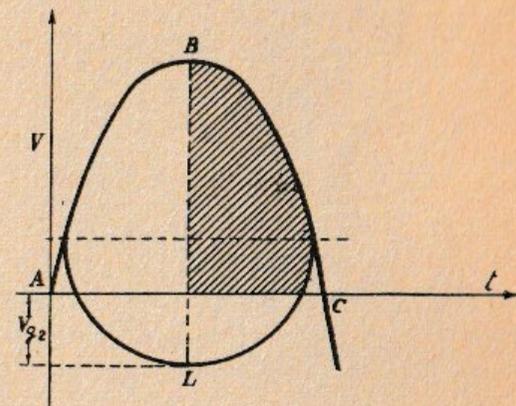


FIG. 60

Abaïssons cette tension. Dès que nous atteindrons le point L l'amorçage se produira, correspondant à la tension de crête alternative. Le courant passera pendant une demi-période.

Si la tension de grille est réduite à la valeur V_{g3} (Fig. 61), l'amorçage se produit au point K et la puissance augmente dans la charge.

Pour une tension de grille positive, on obtient le redressement de la totalité de l'alternance. On comprend ainsi qu'il soit possible de faire varier la puissance dans la charge entre la valeur maximum et la moitié de cette valeur.

Cette variation peut suffire dans bien des cas. Si l'on veut réaliser le contrôle complet, entre une puissance nulle et la valeur

maximum, il faut, comme nous allons le voir, employer une tension alternative de l'électrode de commande.

88. — Commande par courant alternatif.

Alimentons maintenant l'électrode de commande en courant alternatif, mais en insérant un système permettant de faire varier la position de phase par rapport à la tension d'anode.

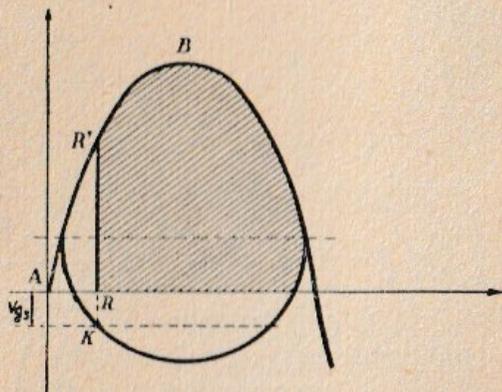


FIG. 61

Admettons qu'il y ait exactement opposition de phase (Fig. 62 a). La tension de grille instantanée V_g est constamment en-dessous du diagramme d'amorçage.

En conséquence le tube ne s'allume pas.

Décalons la tension de grille. Nous obtenons le résultat indiqué en b, figure 62. La tension instantanée V_g coupe le diagramme au point K. Il y a donc amorçage jusqu'à la fin de l'alternance.

Un décalage plus important amène le résultat indiqué figure 62 c ; il y a amorçage pendant une demie période. Enfin, en d, l'amorçage se produit pendant la presque totalité. Pour la correspondance de phase, l'amorçage se produit dès le début de l'alternance.

Ainsi, en agissant uniquement sur le déphasage de la tension de grille — *c'est-à-dire sans dépense d'énergie* — on peut faire varier la puissance graduellement, depuis une valeur nulle jusqu'à la valeur maximum.

Il est d'ailleurs très important de noter que si la position de phase permet d'obtenir un contrôle depuis zéro jusqu'au

maximum, elle ne permet pas de revenir jusqu'à une puissance nulle en continuant de faire varier la phase dans le même sens.

Considérons la figure 63 a. Il n'y a pas amorçage, le déphasage étant de 180° . Un déphasage, comme sur la figure 63 b,

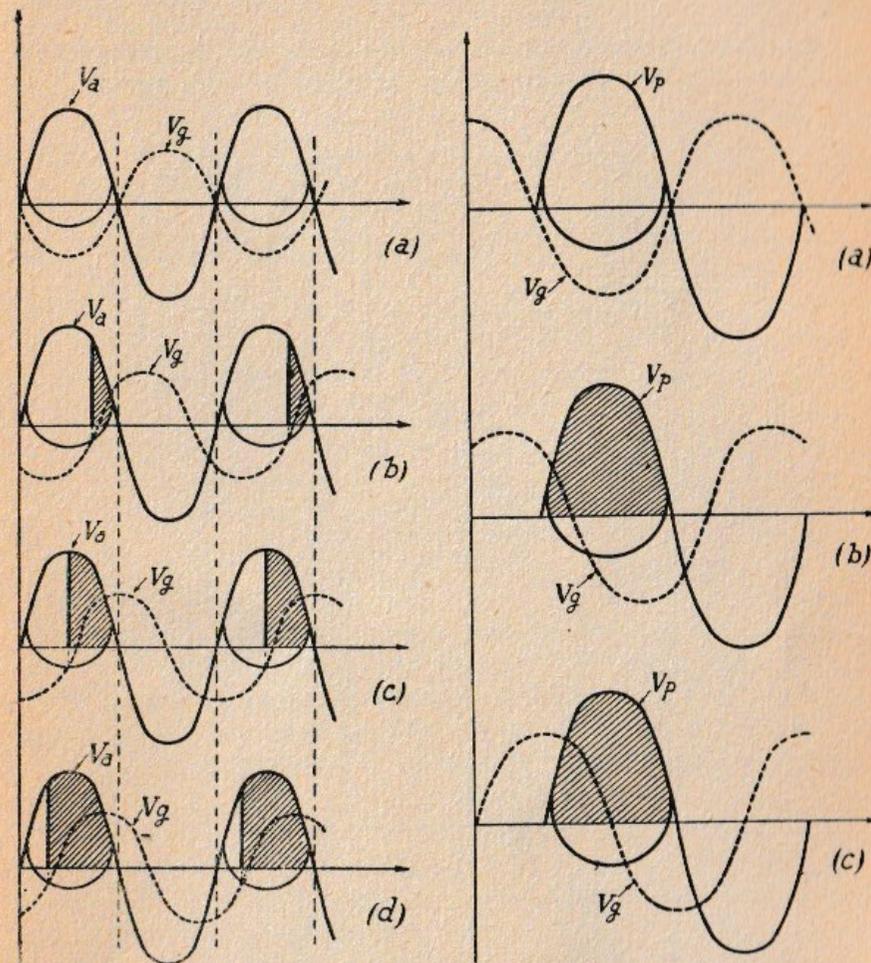


FIG. 62

FIG. 63

provoque l'amorçage pendant toute l'alternance. Il en est de même en c, correspondant à un déphasage encore plus important. Ainsi, la puissance conservera la puissance maximum. Il en sera ainsi jusqu'au moment où le déphasage sera 180° et nous retrouverons alors le cas de la figure a, c'est-à-dire l'extinction.

Nous pouvons donc en conclure que pour un *retard* de phase de 0 — 180°, il y a contrôle progressif — tandis qu'il n'y a aucun contrôle pour une avance de 0 à 180°.

89. — Dispositif de variation de phase avec transformateur de grille.

On peut obtenir cette variation de phase de différentes manières. Nous n'en donnerons que les exemples les plus usuels.

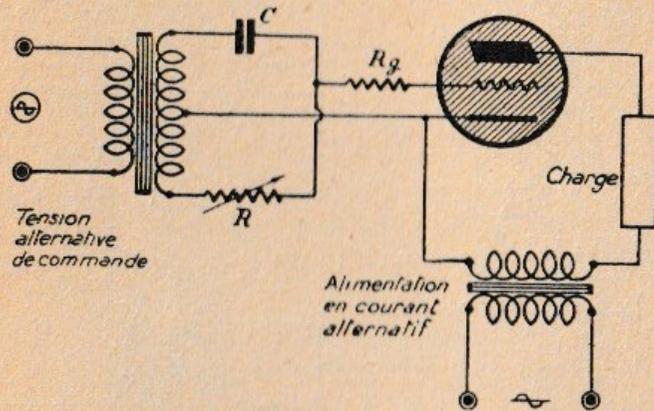


FIG. 64

Un moyen particulièrement simple est indiqué sur la figure 64. On emploie un transformateur dont l'enroulement secondaire à prise médiane, alimente une capacité et une résistance en série.

Le point milieu de l'enroulement est connecté à la cathode. La grille est reliée entre résistance et capacité.

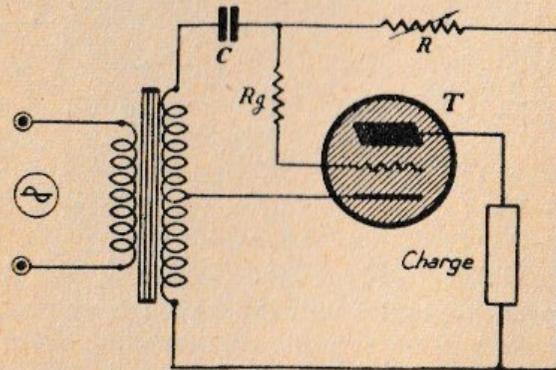


FIG. 65

La valeur des éléments C et R doit être choisie pour que l'intensité qui les traverse soit grande par rapport au courant de grille. Dans ces conditions, la variation de R produit une variation continue de la phase à amplitude constante. On peut évidemment remplacer la capacité C par une bobine de self induction, toutefois le contrôle est moins complet car il est impossible de construire une inductance dont le facteur de pertes soit aussi faible que celui d'un condensateur.

Nous indiquons figure 65 un montage grâce auquel on peut emprunter la puissance redressée et la tension de commande au même transformateur.

90. — Redressement des deux alternances.

Les circuits précédents fournissent des impulsions unidirectionnelles à 50 c/s. Dans certaines applications, il peut être intéressant de s'approcher davantage des conditions de fonctionne-

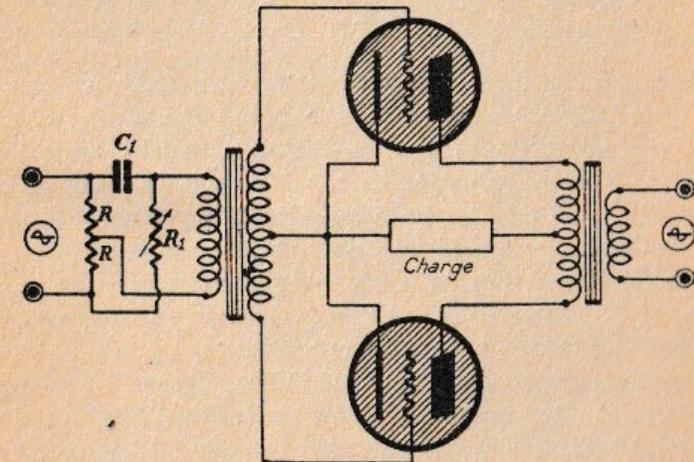


FIG. 66

ment en courant continu pur. On obtient ce résultat en redressant les deux alternances du courant alternatif, au moyen de deux thyratrons travaillant en opposition de phase, dont les tensions anodiques sont fournies par un transformateur à prise médiane.

Une disposition possible est indiquée sur la figure 66.

Les tensions de commande sont fournies par un transformateur à prise médiane. Les deux tubes reçoivent ainsi nécessairement des tensions déphasées de 180°.

Le primaire de ce transformateur est alimenté avec un déphasage variable par rapport à la tension d'anode.

Le principe adopté est le même que sur la figure 65.

91. — Emploi des tensions polyphasées.

Les tensions polyphasées donnent un moyen simple d'obtenir une variation de phase continue, sans variation d'amplitude.

Examinons par exemple, le cas de tension triphasée. On utilise (Fig. 67) un stator analogue à celui d'un moteur asyn-

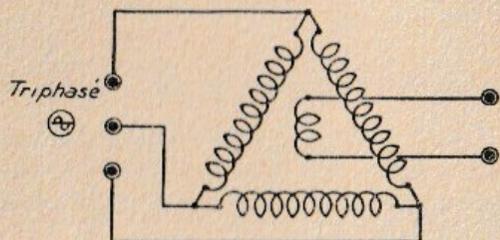


FIG. 67

chrone, c'est-à-dire qu'il comporte trois enroulements identiques décalés d'un angle de 120° . Les bobines étant alimentées en triphasé, il y a production d'un champ tournant dans l'espace situé entre les enroulements. Une bobine placée dans ce champ est le siège d'une tension induite alternative d'amplitude constante mais dont la position de phase varie avec sa position angulaire. Il suffit donc de la faire tourner pour obtenir une variation continue de la phase depuis 0 jusqu'à 360° par rapport à une quelconque des tensions d'alimentation.

Le système peut naturellement être employé avec des tensions diphasées, les deux bobinages fixes étant décalés de 90° .

On peut commander simultanément deux thyratrons symétriques, comme sur la figure 66, soit en prévoyant un point milieu sur la bobine mobile, soit encore, en se servant de la tension fournie par cette dernière pour alimenter un transformateur avec prise médiane à l'enroulement secondaire.

92. — Commande par tube à vide.

Dans les montages où le déphasage est commandé par une résistance variable, on peut généralement remplacer cette dernière par un tube à vide dont on fait varier la résistance intérieure au moyen d'une tension continue.

Il suffit alors de disposer d'une source de quelques volts pour contrôler la puissance fournie par le redresseur.

Nous donnons un exemple de ce genre de montage sur la figure 68.

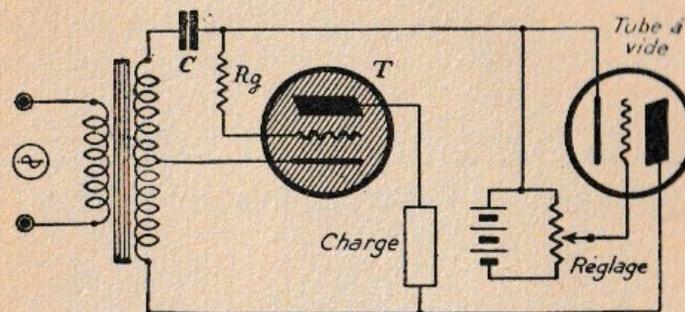


FIG. 68

On reconnaît immédiatement le circuit déjà donné figure 65, dans lequel la résistance variable a été remplacée par un tube à vide. La tension anodique du tube à vide est fournie en courant alternatif redressé par le thyriston.

CHAPITRE IX

MOTEURS ÉLECTRIQUES ET THYRATRONS

Applications diverses des thyratrons

93. — Généralités.

Un thyatron peut être :

- a) Redresseur ;
- b) Interrupteur ;
- c) Dispositif de réglage de puissance.

Ces différentes fonctions peuvent être employées pour la commande des moteurs électriques.

Dans les moteurs à courant continu, un point toujours délicat est la *commutation*, c'est-à-dire l'opération qui consiste à envoyer le courant successivement dans les différentes sections de l'induit. C'est le *collecteur* qui accomplit cette fonction.

Le collecteur est un distributeur ou un commutateur : on peut donc le remplacer par des thyratrons.

En agissant sur la phase de la tension de grille, il est facile d'obtenir un réglage de la vitesse de rotation.

Enfin, le thyatron étant un redresseur, il devient possible d'alimenter le moteur en courant alternatif.

Tels sont les grands principes appliqués dans la commande des moteurs au moyen de thyratrons.

94. — Moteur à courant continu.

Un moteur à courant continu se compose d'une carcasse portant les *inducteurs*, dont les pôles sont au nombre de 2, 4, 6, etc...

La partie tournante est l'*enroulement induit*, divisé en un certain nombre de sections dont chacune correspond à deux

lames du *collecteur*. Des balais fixes amènent le courant au collecteur. Cette disposition classique (Fig. 69) a été adoptée par commodité.

Si l'arbre était maintenu fixe et si le courant inducteur était amené par des bagues et des frotteurs, on constaterait naturellement que les inducteurs tourneraient autour de l'induit. Le collecteur serait fixe et les frotteurs ou balais tourneraient autour de lui.

C'est d'ailleurs cette disposition qui est adoptée de préférence dans les alternateurs et dans les moteurs synchrones : enroulements induits fixes et inducteurs tournants.

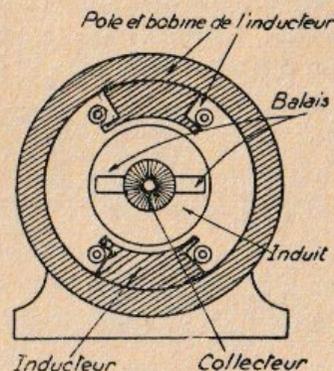


Fig. 69

C'est aussi cette disposition qu'on adopte pour la commande des moteurs par thyratrons. Le distributeur des tensions dans les sections induites est remplacé par des thyratrons et la commutation est assurée par un distributeur de tension de grille qui est solidaire de la partie tournante. Les tensions mises en jeu dans le circuit de grille sont très faibles et la puissance correspondante est peu importante.

Il n'y a ainsi aucune étincelle au distributeur et aucun risque de « coup de feu » ou d'arc au collecteur.

95. — Disposition schématique et fonctionnement.

Nous supposerons pour simplifier que l'induit comporte seulement trois sections. La disposition schématique est indiquée sur la figure 70.

Le thyatron T_1 est amorcé. La section 1 est parcourue par le courant d'alimentation. Il en résulte un couple moteur. Le

mouvement produit une force contre-électromotrice dans la section 1. La disposition est telle qu'au moment où l'inducteur mobile va cesser d'agir sur 1, cette force électromotrice soit maximum et pratiquement égale à la tension d'alimentation. Il en résulte que la tension effective appliquée à l'anode de T_1 est voisine alors de la tension d'extinction. A ce moment le frotteur des commutateurs tournant quitte la lame 1. Le courant dans le transformateur G_1 est brusquement interrompu et il en résulte une surtension négative appliquée sur G_1 . Cette circonstance favorise la désionisation et T_1 désamorçage.

Le frotteur touche la lame 2, ce qui a pour résultat de faire amorcer T_2 et le courant traverse alors la section 2. La même suite de faits se répète... L'emploi de transformateur dans les circuits de grille permet d'obtenir de véritables impulsions d'amorçage et de désamorçage.

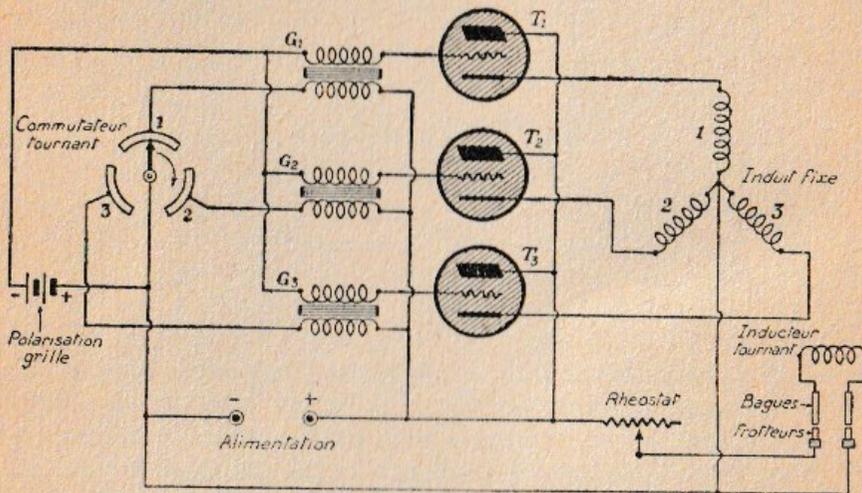


FIG. 70

La commutation n'est correcte qu'à partir d'une certaine vitesse correspondant à l'existence d'une certaine force contre électromotrice. S'il est nécessaire de faire fonctionner le moteur à vitesse très réduite, il faut prendre des dispositions spéciales pour assurer l'extinction des tubes.

96. — Alimentation en courant alternatif.

A condition de redresser le courant qui traverse les inducteurs on pourrait alimenter le montage précédent avec du courant alternatif.

Pour certaines applications, cette possibilité est d'un intérêt extrême : pour la traction électrique en particulier, et, d'une manière plus générale, pour toutes les applications exigeant, en courant continu, l'emploi d'un *moteur série*.

L'emploi d'un moteur-shunt est impossible quand il faut développer un effort considérable au démarrage. Or, il n'existe aucun moteur à courant alternatif qui possède un très grand couple de démarrage. C'est pour cette raison que les lignes de chemin de fer électrique sont généralement alimentées en courant continu. S'il en est autrement, la transformation alternatif/continu est faite à bord de la locomotive (système Ward-Léonard).

Le thyatron nous fournit un moyen de résoudre ce problème.

97. — Alimentation par courant redressé.

Le premier moyen consiste tout simplement à redresser le courant alternatif. En partant d'une distribution triphasée et en redressant les deux alternances de chaque phase, on obtient directement du courant raisonnablement continu.

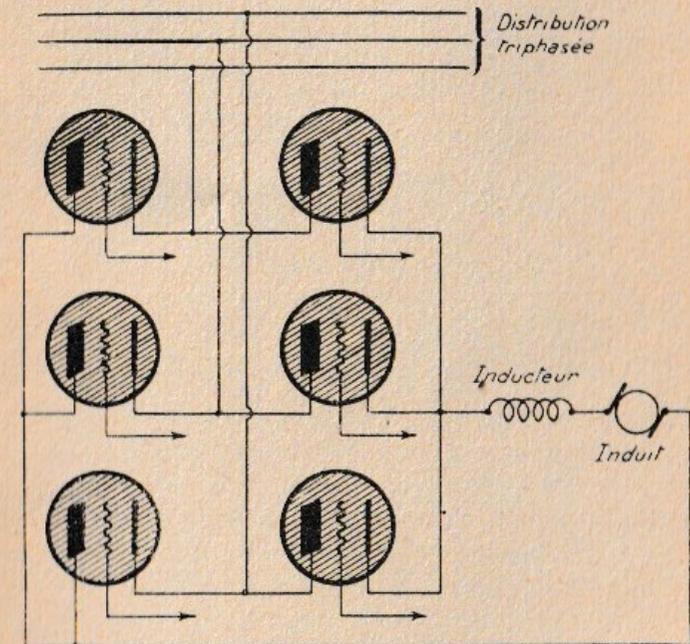


FIG. 71

On peut adopter, par exemple, la disposition schématique indiquée figure 71. Le moteur est du modèle ordinaire, utilisé

sur courant continu. Il y a deux thyratrons par phase, d'où il résulte que la tension d'ondulation résiduelle est à 300 périodes/s en partant d'une fréquence de 50 périodes/s. Elle n'a aucune action sur le comportement du moteur.

Il est inutile de prévoir un rhéostat de démarrage puisque la puissance redressée est commandée par déphasage. On peut ainsi obtenir toutes les variations de vitesse désirables. Il va sans dire que les tensions d'amorçage des différents thyratrons doivent présenter la position de phase convenable. Ce résultat est facile à obtenir au moyen d'un dispositif comme celui de la figure 67, mais dans lequel le système induit est bobiné en triphasé.

98. — Moteur dit « Synchrone ».

Une solution plus complète est donnée par l'adaptation du système figure 70 au courant alternatif.

On obtient une disposition indiquée sur la figure 72.

Les thyratrons de la rangée supérieure sont des tubes redresseurs fournissant une puissance variable, suivant la position de phase de l'impulsion d'allumage transmise à la grille.

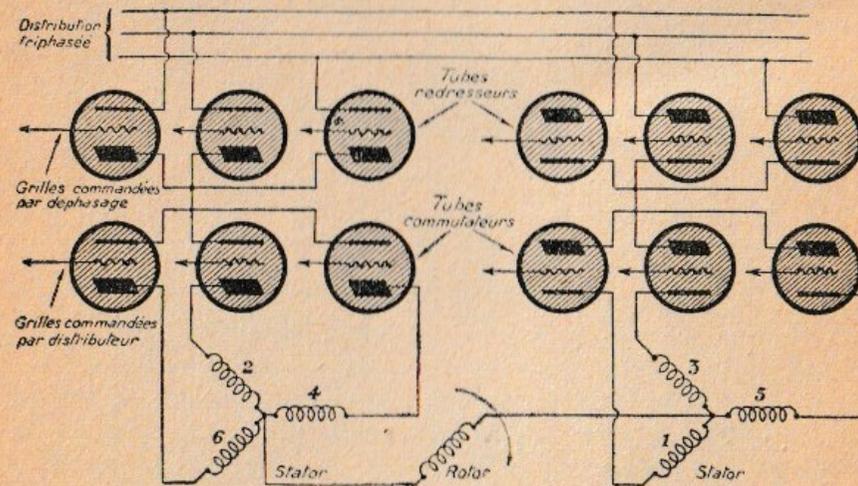


FIG. 72

Les autres thyratrons sont des commutateurs dont l'action est la même que celle des tubes de la figure 70. Leur allumage est déterminé par une tension transmise par le distributeur solidaire de l'arbre moteur, non figuré sur le croquis.

Le système peut naturellement être adapté au moteur shunt. On peut aussi faire fonctionner chaque tube thyatron à la fois comme redresseur et comme commutateur.

Le système peut enfin être utilisé à la récupération c'est-à-dire qu'il est réversible. Si le moteur est entraîné, le système débite de la puissance dans la ligne.

Certains auteurs (A. H. BEILER — Transaction of American Electrical Engineer — 57.19 (1938), signalent des rendements de 80 à 90 % pour un moteur alimenté sous 2 300 volts 60 périodes/s, fournissant une puissance variable de 100 à 400 chevaux-vapeur.

QUELQUES AUTRES APPLICATIONS

99. — Généralités.

Nous ne pouvons passer en revue toutes les applications possibles parce qu'elles sont trop nombreuses. Elles utilisent presque tous les faits suivants :

- Le thyatron est un relais dont l'action peut être provoquée par une très faible énergie — surtout, s'il s'agit d'un modèle à grille-écran ;
- Son action est extrêmement rapide ;
- La chute interne est très faible (15 volts) c'est un générateur à tension constante ;
- Son action peut facilement être graduée, en agissant sur le circuit de l'électrode de commande.

100. — Régulateur automatique d'anesthésie.

Les thyratrons permettent ainsi de résoudre facilement tous les problèmes de régulation : vitesse, température, tension, etc...

On a par exemple réalisé un régulateur automatique d'anesthésie. Le principe utilisé est le suivant. Lorsque le patient est profondément endormi, les variations de potentiel entre deux points du cerveau ont une allure très régulière et sont de faible amplitude. Par contre, dès que le sommeil devient moins profond, les oscillations prennent une amplitude de plus en plus grande. Dès qu'elles dépassent un certain seuil, que le chirurgien peut régler à son choix, le thyatron s'amorce. Le courant est utilisé pour commander l'admission d'une plus grande quantité d'anesthésique dans le circuit.

101. — Régulateur automatique de température.

Le but à atteindre est le suivant : maintenir la température d'un four à une valeur fixe. Plusieurs procédés peuvent être employés. Un des plus simples et des plus précis combine l'emploi d'un thermocouple, d'une cellule photoélectrique et d'un thyatron.

L'énergie de chauffage du four est transmise, tout au moins partiellement, par le tube thyatron.

Le thermo-couple est placé dans l'enceinte dont il s'agit de contrôler la température. Le courant fourni traverse le cadre d'un galvanomètre à miroir. Ce dernier envoie un rayon de lumière

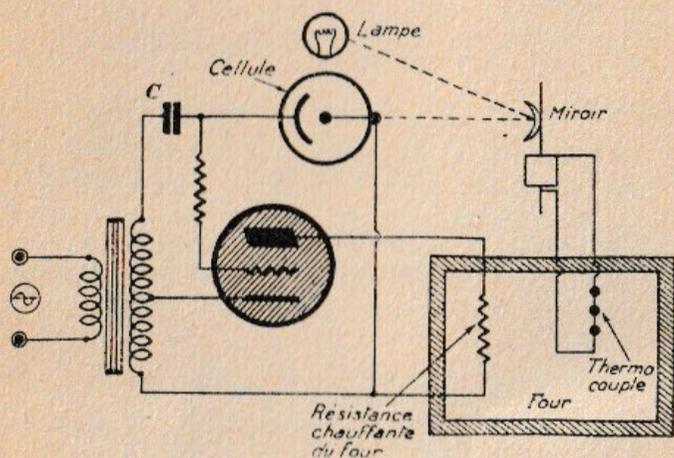


FIG. 73

sur la cathode d'une cellule photoélectrique. Quand le courant augmente, le flux lumineux reçu par la photocathode diminue et réciproquement.

La disposition générale est donnée figure 73. La cellule photoélectrique agit comme une résistance variable dans le circuit de réglage de la phase dont le principe est exactement le même que celui de la figure 65. La position de phase de l'amorçage du thyatron est ainsi sous la dépendance de la température. Un système comme celui de la figure 73 permet de maintenir, à une fraction de degré près, des températures de plusieurs centaines de degrés, en dépit des variations diverses.

102. — Redresseur à tension stabilisée.

Il s'agit encore d'une commande automatique : maintenir constante la tension continue fournie par un redresseur, en dépit

des variations de charge ou des variations de la tension d'alimentation.

Nous avons déjà signalé plus haut un exemple de montage utilisant un tube luminescent comme élément fournissant la tension de référence. Le réglage de la tension, dans cet exemple était effectué au moyen de tubes à vide.

Les thyatrons permettent d'obtenir plus simplement un résultat largement suffisant dans la plupart des applications.

Pour commander la puissance délivrée dans le circuit d'anode on agit sur la grille des thyatrons au moyen d'une tension continue empruntée à la source à régler. Pour que la stabilisation soit efficace, il faut que la totalité de la variation de tension soit transmise aux électrodes de contrôle.

Toutefois, il est impossible d'appliquer la totalité de la tension redressée aux grilles de contrôle. L'emploi d'un diviseur de tension à résistances n'est pas possible car la tension de régulation serait atténuée dans le rapport des résistances.

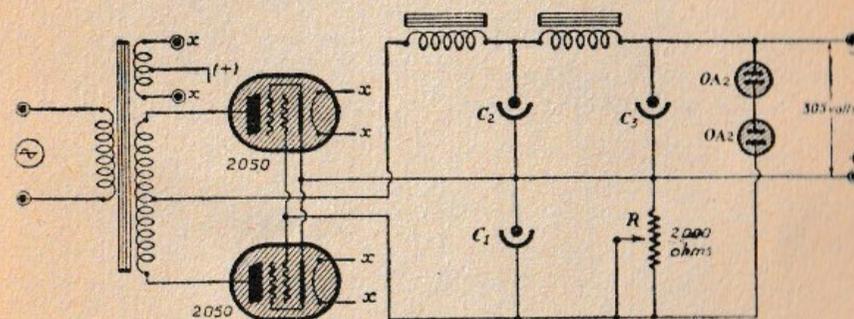


FIG. 48

On tourne la difficulté en réalisant le diviseur de tension au moyen de tubes à cathode froide qui maintiennent entre leurs électrodes une tension pratiquement constante.

La disposition générale est indiquée figure 74. Il s'agit d'une alimentation destinée à fournir une tension de 305 volts environ. Les thyatrons sont du type 2050. La grille-écran est connectée à la cathode. Le filtre est à inductance d'entrée. En parallèle sur les bornes de sortie sont montés deux tubes régulateurs OA_2 qui maintiennent entre leurs électrodes une tension de 151 volts, ainsi qu'une résistance variable de 2 000 ohms.

Les variations de tension apparaissent entre les extrémités de cette résistance et sont appliquées entre grille et cathode des thyatrons.

Il est indispensable que cette tension soit rigoureusement continue : sans ondulation résiduelle.

On prévoit donc un filtrage au moyen de C_1 , qui doit posséder une capacité de plusieurs centaines de microfarads (son impédance à 50 c/s doit-être négligeable par rapport à R). Cette capacité peut cependant être économiquement réalisée sous un petit volume car elle ne supporte qu'une tension de quelques volts.

La régulation n'est assurée qu'entre deux limites. Quand la tension devient exagérément élevée, la tension entre grille et cathode des thyratrons augmente et les tubes ne s'amorcent plus. Dans ces conditions la tension baisse rapidement et le même phénomène se reproduit. Il y a ainsi production d'oscillations de relaxation.

Un montage comme celui de la figure 74, correctement réalisé, permet d'obtenir une tension variant de 296 à 305 volts quand l'intensité passe de 50 à 300 milliampères.

103. — Réglage de tensions alternatives. Réglage de lumière.

Quand il s'agit du réglage automatique ou manuel d'une tension alternative, il est souvent commode d'utiliser une réactance avec circuit magnétique saturable (Fig. 75). Sur ce circuit sont

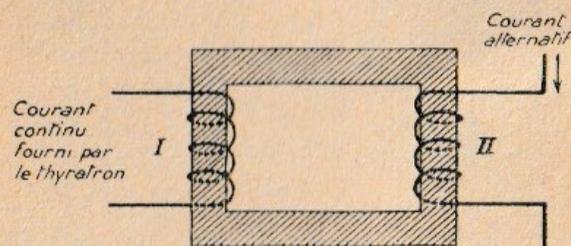


Fig. 75

bobinés deux enroulements électriquement séparés. L'un d'eux est monté en série avec la tension à régler.

L'autre est traversé par du courant continu dont on peut faire varier l'intensité c'est le courant de commande. Quand l'intensité est nulle dans le circuit C , la perméabilité du circuit est maximum et le coefficient de self induction du circuit II est également maximum. En conséquence, l'impédance est très élevée.

Au contraire, quand on augmente l'intensité dans le circuit I on provoque une diminution de perméabilité dans le circuit magnétique et l'impédance de l'enroulement II diminue.

Il est généralement très pratique d'employer des thyratrons pour fournir le courant continu de commande.

On agit soit manuellement, soit automatiquement sur la position de phase de la tension de grille.

Ce procédé permet d'obtenir la régulation automatique d'une tension ou d'une intensité alternative. On l'utilise aussi couramment pour obtenir des effets d'éclairage très progressifs et très gradués (rampe de théâtres, décors, etc.).

104. — Soudure électrique.

Dans la soudure électrique par points, il est essentiel que chaque point de soudure corresponde à une quantité d'électricité bien définie. On obtient ainsi des soudures parfaitement régulières. La quantité d'électricité nécessaire pour chaque soudure varie naturellement avec la nature du métal, son épaisseur, etc... Une action trop prolongée des électrodes a pour conséquence un échauffement exagéré des parties voisines d'où peuvent résulter des modifications des propriétés mécaniques, au contraire, une application insuffisante se traduit par une soudure défectueuse.

On évite radicalement ces inconvénients en commandant le courant dans les électrodes au moyen d'un thyatron qui dose automatiquement la puissance dès que la valeur convenable pour un point a été déterminée.

Signalons que pour certaines soudures, le courant passe pendant une seule demi-période. Le thyatron permet d'obtenir ce résultat avec toute la précision désirable.

105. — Amplificateur pour servo-commande.

Il s'agit de commander le mouvement d'un moteur dans un sens ou dans l'autre jusqu'à obtenir un certain résultat, comme la coïncidence de deux repères, par exemple.

Tout écart entre les deux repères se traduit par un « signal d'erreur » qui est, soit une tension continue dont le sens détermine le sens de l'erreur, soit, plus souvent encore, une tension alternative dont la position de phase est fonction de l'erreur de position. Il s'agit de convertir ce signal d'erreur en un mouvement du moteur dans le sens voulu.

On peut employer des amplificateurs spéciaux à tubes à vide ou des amplificateurs à thyratrons qui peuvent fournir une amplification en puissance beaucoup plus considérable. Nous indiquons une disposition possible sur la figure-76.

Les deux thyratrons T_1 et T_2 sont montés en opposition. Les électrodes de commande sont excitées par une tension alternative qui constitue le signal d'erreur.

Si l'erreur est nulle la tension est exactement en phase avec le courant d'alimentation. Les enroulements secondaires du transformateur sont connectés de telle sorte que les tensions transmises

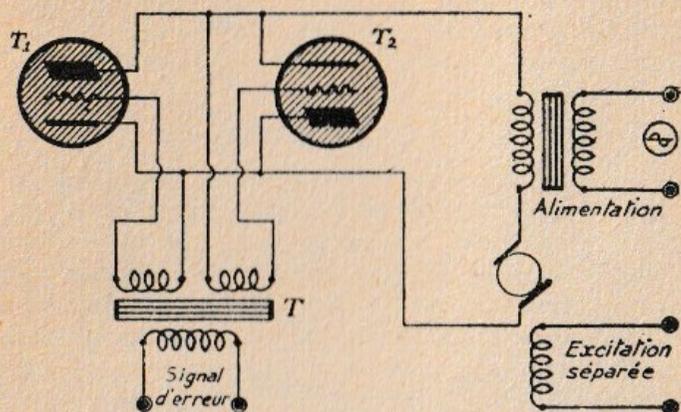


Fig. 76

aux électrodes de commande provoquent pour chacun des tubes l'amorçage pendant une demi période. Le rotor est alors traversé par un courant purement alternatif et il n'en résulte aucun couple moteur.

En revanche, un déphasage aura pour effet de provoquer la naissance d'une composante continue ce qui fera démarrer le moteur dans le sens voulu.

CHAPITRE X

LES IGNITRONS

106. — Généralités.

On peut considérer un thyatron comme un redresseur à cathode chaude (phanotron) dans lequel on *empêche* l'amorçage en refoulant les électrons vers la cathode. Si l'électrode de contrôle n'existait pas, l'amorçage se produirait au début de chaque alternance positive, grâce aux électrons produits par la cathode,

L'ignitron est tout différent. C'est un redresseur dont la cathode est constituée par du mercure liquide. On sait que, dans ces conditions, il faut provoquer l'ionisation de l'atmosphère interne pour amorcer l'arc.

Mais un dispositif particulier est prévu pour obtenir ce résultat, d'une manière pratiquement instantanée, à *un moment quelconque*, de l'alternance positive, à l'aide d'une électrode auxiliaire dite *igniter*, c'est-à-dire : *allumeur*.

En l'absence de tension d'allumage, ou en cas d'un accident quelconque dans le circuit de contrôle, le tube ne s'amorce pas.

Il résulte de ce principe d'importants avantages. D'abord, la sécurité de fonctionnement est beaucoup plus grande puisqu'on *provoque* l'amorçage au lieu d'en empêcher la manifestation. Ensuite, nous verrons plus loin que le dispositif peut, sans inconvénient, supporter des surcharges considérables sans être mis hors d'usage. Il est, enfin, prêt à fonctionner immédiatement.

107. — Principe.

Le principe de base a été découvert par des ingénieurs américains J. SLEPIAN et L. R. LUDWIG.

Dans un redresseur à arc de mercure, l'amorçage est provoqué, au départ, au moyen d'une décharge auxiliaire, soit par basculement de l'ampoule, soit au moyen d'une électrode mobile commandée

par un électro aimant, soit encore par l'application d'une tension très élevée. Après quoi, grâce à la présence de plusieurs électrodes, on s'arrange pour que la décharge ne s'interrompe plus pendant le cours du fonctionnement.

SLEPIAN et LUDWIG ont découvert qu'on pouvait amorcer l'arc au moyen d'une électrode semiconductrice plongeant dans le bain de mercure (Fig. 77). Ce crayon d'allumage doit être construit en un matériau réfractaire à haute résistivité, non

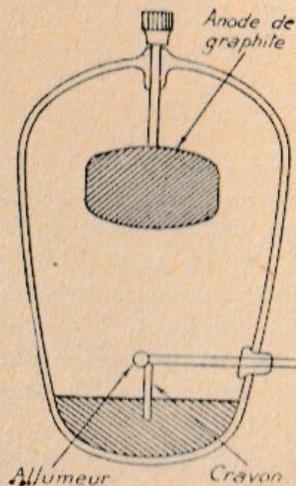


Fig. 77

mouillé par le mercure. En appliquant une tension continue de l'ordre de 200 à 300 volts entre « allumeur » et mercure, de manière que le premier soit positif, on provoque l'allumage pratiquement instantané de l'arc.

108. — Mécanisme d'allumage.

On constate que l'allumage ne se produit que pour un sens déterminé de la tension appliquée. Il faut que l'allumeur soit positif. De plus la présence d'impureté, dans le mercure, comme l'or, l'étain, l'argent empêche l'allumage parce que, dans ces conditions, le mercure mouille l'électrode. En d'autres termes, la présence d'un ménisque dû à la tension superficielle est indispensable au point de pénétration de l'électrode dans le liquide. Ces observations conduisent à cette idée que l'allumage est dû au gradient de potentiel élevé existant entre l'électrode et le

ménisque. Il se produit alors une émission par cathode froide provoquant ionisation et amorçage.

L'intensité instantanée déterminant l'amorçage est généralement comprise entre 10 et 40 ampères sous une tension de 200 à 300 volts. Mais il faut bien comprendre qu'il ne s'agit pas d'une intensité moyenne mais d'une valeur instantanée. Il suffit, en réalité, d'une très brève impulsion, correspondant à une puissance moyenne extrêmement faible.

109. — Production de l'impulsion d'allumage.

L'impulsion d'allumage est généralement obtenue au moyen d'un redresseur, à partir du secteur alternatif.

En faisant varier la position de phase de l'impulsion d'allumage, on obtient un contrôle progressif de la puissance, exactement comme avec un thyatron.

Pour obtenir ce résultat il est particulièrement commode d'employer un thyatron placé dans le circuit de l'électrode d'allumage. C'est un montage très communément utilisé. Il va sans dire qu'il suffit d'un thyatron de petite puissance pour obtenir ce résultat. Le tube d'allumage peut être naturellement alimenté en courant alternatif.

110. — Construction des ignitrons.

Nous donnons figure 78 la coupe exacte d'un thyatron industriel. L'enveloppe est constituée par deux parois en acier inoxydable entre lesquelles circule l'eau de refroidissement.

L'anode est un cylindre de graphite, connecté à l'extérieur au moyen d'un joint métal/verre.

La cathode de mercure est directement en contact avec l'enveloppe du tube. Un écran, facilitant la désionisation est placé entre anode et cathode. Un autre écran de graphite sert à diffuser la décharge et à éviter que l'arc frappe directement l'allumeur.

Une anode auxiliaire permet de stabiliser le spot cathodique pendant les intervalles de faible intensité.

Certains modèles sont prévus avec deux électrodes d'allumage. Ces tubes sont construits pour des tensions d'utilisation compris entre 125 et environ 1 000 volts.

III. — Caractéristiques de fonctionnement.

A titre documentaire nous donnons ci-dessous les principales constantes de fonctionnement de l'ignitron GL 5564-GL 507

construit par la Radio Corporation of America. ⁽¹⁾ et, en France par la Cie Thomson-Houston.

Tension inverse et directe maximum : 2 100 volts

Intensité anodique maximum (ampères)	C continu 300 volts	C continu 600 volts
<i>Instantanée</i>	3 600	2 400
Valeur moyenne :		
a) Régime continu	400	300
b) Pendant 2 heures	600	450
c) Pendant 1 minute	800	600
Surcharge (0,15 seconde maximum)	25 000	19 000

Caractéristique de Puissance

Kilowatts fournis à		Nombre de Tubes
300 volts	600 volts	
400	750	6
500	1000	6
750		12
1000		12

112. — Caractéristiques des circuits d'allumage.

Les tensions d'allumage doivent être comprises entre 200 et 900 volts, avec des intensités de pointe comprises entre 30 ampères minimum et 400 ampères maximum. L'intensité moyenne dans le circuit d'allumage doit être de l'ordre de 1 à 2 ampères. La durée moyenne des impulsions d'allumage doit être au maximum de 100 microsecondes.

(1) Voir aussi la table spéciale.

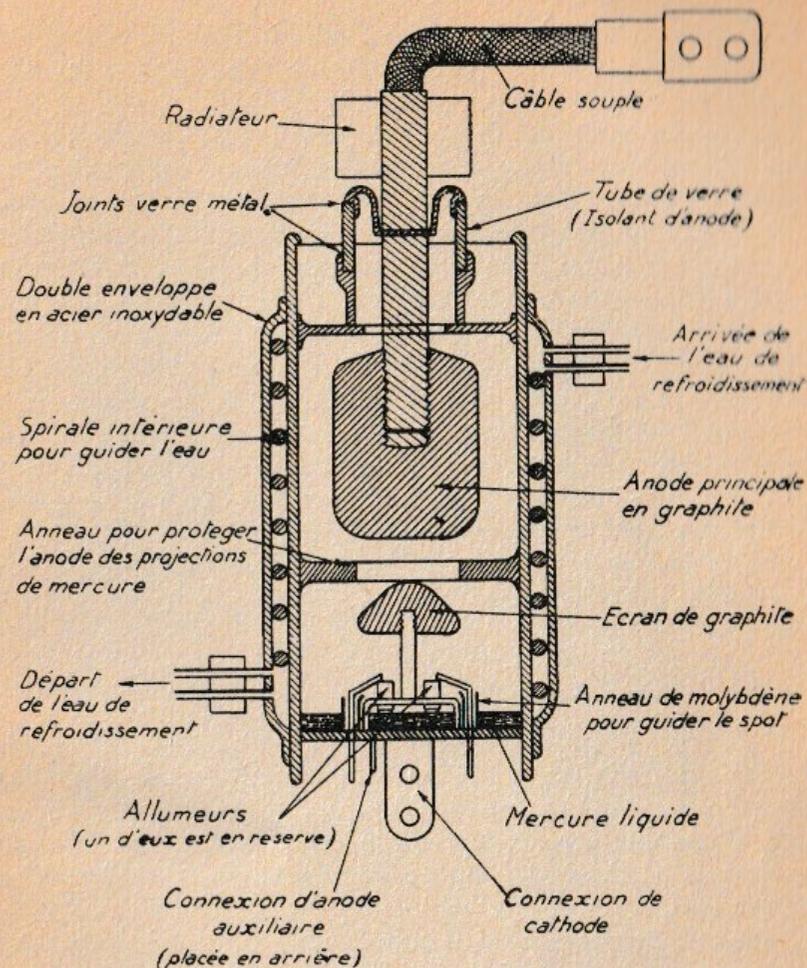


FIG. 78

113. — Capacité de surcharge.

Nous avons reconnu que, dans les tubes à cathode chaude, toute surcharge, même de très courte durée entraînait une détérioration de la cathode. Ici, une surcharge a pour effet une augmentation de pression interne par élévation de température. Elle augmente les risques d'arc inverse sans agir en aucune manière sur la durée de vie du tube.

Ainsi le tube dont nous donnons les caractéristiques de fonctionnement plus haut peut supporter un régime de surcharge de 50 % pendant deux heures et de 100 % pendant une minute.

Bien mieux, pendant $3/5$ de seconde, il peut supporter plus de soixante fois la valeur normale, c'est-à-dire l'énorme intensité de 25 000 ampères

La possibilité de passage d'une telle intensité sans accroissement notable de la chute de tension interne est encore un détail qui demeure inexpliqué dans le comportement des ignitrons. On ne peut invoquer l'augmentation de pression de la vapeur de mercure car celle-ci ne peut se produire aussi rapidement. Il s'agit plus vraisemblablement d'une augmentation locale de la densité ionique due à la présence de gouttelettes de mercure liquide au point d'impact de l'arc. Ce qui rend cette hypothèse assez vraisemblable, c'est que la possibilité de surcharge aussi importante n'existe que pour les redresseurs monopolaires. Dans les redresseurs à plusieurs anodes, la chute de tension augmente énormément au moment d'une surcharge. On attribue ce phénomène au fait que la distance entre anodes et cathode liquide est alors beaucoup trop grande pour qu'il soit possible de faire intervenir le brouillard de mercure au voisinage de la tache cathodique.

114. — Groupement des ignitrons.

Il est pratiquement impossible de faire fonctionner directement des ignitrons en parallèle, puisque l'allumage d'un tube paralyse l'amorçage des autres. D'autre part les charges se répartiraient d'une manière irrégulière entre les éléments. L'emploi d'impédances de séparation amène, nécessairement une diminution du rendement.

Quand il est nécessaire d'obtenir une puissance supérieure à la capacité d'un seul tube, on peut employer plusieurs ignitrons que l'on fait travailler successivement en régime de surcharge. Les tubes sont automatiquement mis en service au moyen d'un oscillateur à relaxation équipé de thyratrons. Cette solution est généralement beaucoup plus économique que l'emploi d'un seul tube beaucoup plus puissant.

Quand on dispose d'une distribution polyphasée on peut grouper les ignitrons symétriquement sur les différentes phases. Par exemple, avec une distribution triphasée, on peut alimenter douze tubes au moyen d'une disposition en double hexaphasé.

Le groupement des ignitrons en série peut généralement se faire sans difficulté. On peut ainsi commander des tensions double, triple de la tension maximum supportée par un seul tube. Plus simplement encore, on construit des tubes spéciaux dans lesquels

l'arc se divise entre diverses anodes intermédiaires, disposées entre cathode et anode principales. Certains tubes ont été construits avec 20 anodes. Il est généralement recommandé de prévoir un système diviseur de tension bien que cette précaution ne soit pas toujours indispensable.

115. — Emploi des Ignitrons. Comparaison avec les Thyratrons.

Les emplois des Ignitrons sont en principe les mêmes que ceux des thyratrons ; toutefois ils ne sont utilisés que pour des puissances beaucoup plus considérables.

Les thyratrons usuels peuvent, par exemple, (type RCA5503) fournir 1,6 ampères sous 15 000 volts (soit 24 kilowatts) alors qu'un ignitron de modèle courant (RCA. GL 5564/GL 507) peut donner 180 kilowatts. Il est juste d'ajouter que l'installation de l'ignitron exige un refroidissement par circulation d'eau s'il est utilisé à grande puissance. De plus, il est nécessaire de prévoir un thyatron auxiliaire pour fournir le courant d'allumage.

L'énorme capacité de surcharge des ignitrons les rend extrêmement précieux pour certaines applications : soudure, démarrage des moteurs de levage et de traction. Ils sont aussi beaucoup plus robustes et leur durée de vie est plus grande.

Enfin l'ignitron peut être instantanément mis en service alors que les thyratrons exigent une période plus ou moins longue de préchauffage de la cathode.

I G N I T I O N S

N° Type	Description	Tension aliment.	Puissance aliment.	Pointe (volts)	Surcharge (ampères)	Temps (sec.)	Soudure (sec.)	Intens. Pointe		Intens. moyenne	Construc-tion
								Redes-seur	Soudure		
SS50	Retrouv. dis- sement par	250	100	1100	22	550	22,4	22,4			RCA
TH7010	air ou eau	600	300	3360	22	1680	12,1	12,1			Thomson- Westinghouse
Model A	Soudure par arc, retour-	250	35	390	31	195	5,6	5,6			RCA
	par air	250	105	1170	31	585	3	3			Thomson- Houston
SS51	Soudure par arc	250	200	2240	18	1130	5,6	5,6			RCA
TH7020	Model B	600	200	940	7,5	470	30,2	30,2			Westinghouse
	Redresseur, service	250	600	6700	18	3350	30,2	30,2			Thomson- Houston
	discontin-		600	8000	6	1400	40	40			Houston
SS52	Soudure par arc	250	400	4780	14	2240	75,6	75,6			RCA
TH7030	Model C	600	400	1860	5,8	930	140	140			Westinghouse
		250	1200	13450	14	6730	75,6	75,6			Thomson- Houston

Redresseur	discontin		500	6000	6	1600	100			
SS53	Soudure	250	800	9000	11	4500	355	355		RCA
TH7040	Model D	600	800	3740	4,6	1870				Westinghouse
		250	2400	27000	11	13500	192	192		Thomson- Houston
SS54	Redresseur	900	6000	4500		600	100	75		RCA
	Soudure	2400	1200	3000	1,5	1500	75	113		Westinghouse
SS55	Redresseur	900	12000	9000		1800	200	150		RCA
	Soudure	2400	1105	6000	1,66	3000	207	135		Westinghouse

1) Conditions d'alimentage pour Les Modeles : SS50 - S1 - S2 - S3 - Pointe de tension positive de 200 volts minimum, 900 maximum. Intensité de pointe : 30 Ampères minimum. Courant moyen : 1 Ampère. Durée d'allumage max. 100 ms.

SS54 - SS55 - Pointe de tension positive : 150 min. 900 max. Pointe d'intensité : 40 min. 100 max. Intensité moyenne : 2 Ampères. Durée 100 ms max.

2) Conditions d'alimentation de l'anode auxiliaire pour SS54 et S3 : Tension inverse de pointe (anode principale amorcée : 25 max. (mode non amorcée : 150 max. Intensité moyenne : 5 Ampères.

CHAPITRE XI

EMPLOI D'AUTRES VAPEURS MÉTALLIQUES
QUE LE MERCURE

116. — Généralités.

Un des premiers dispositifs électroniques qui ait fait l'objet d'emplois industriels est le redresseur à arc de mercure. Il est d'ailleurs assez curieux de remarquer que même encore actuellement bien des détails de fonctionnement ne peuvent faire l'objet d'une explication satisfaisante.

Depuis l'époque déjà lointaine de l'invention de ce redresseur de nombreuses tentatives ont été faites pour remplacer la vapeur de mercure par une autre vapeur métallique. Aucun résultat digne d'intérêt n'a pu être obtenu.

Il est donc probable que les tubes à vapeur de mercure seront encore pendant longtemps l'objet de développements et de perfectionnements.

Nous pensons toutefois devoir signaler des travaux récents utilisant la vapeur de caesium (1).

117. — Emploi de la vapeur de Caesium.

Notons d'abord qu'il ne s'agit que d'un dispositif expérimental, mais les résultats semblent assez sensationnels pour devoir être au moins indiqués.

Le caesium joue un double rôle. Sous forme d'un dépôt adsorbé sur la surface de la cathode, il est d'abord une couche émissive. Ensuite, sa vapeur neutralise la charge d'espace et permet le fonctionnement avec une très faible chute de tension.

Le tube est chauffé à une température de 150 à 180° de manière à obtenir une pression de vapeur suffisante. Les molécules de caesium sont précipitées par agitation thermique sur la cathode ou elles sont maintenues partiellement par adsorption.

Le potentiel d'extraction de la couche monoatomique de caesium est de l'ordre de 1,7 volts.

La transposition de l'équation de RICHARDSON pour le cas particulier du caesium adsorbé aurait d'après Hull, la forme suivante :

$$I_s = 460 T^2 e^{-\frac{19500}{T}}$$

I_s en ampères/cm² ;

T en degrés absolus.

Le calcul indique une intensité de courant électronique de l'ordre de un ampère par centimètre carré, pour une température de 185 centigrades.

Grâce au blindage thermique de la cathode, on peut atteindre un rendement électronique de 20 ampères par watt de chauffage.

D'après Hull, ce type de cathode aurait une durée de vie illimitée puisque le caesium passe continuellement de l'état de vapeur à l'état de couche monoatomique.

Le tube expérimental décrit par Hull était prévu pour une intensité moyennée de 200 ampères.

La chute de tension dans le tube était comprise entre 3 et 6 volts pour des intensités de pointe comprises entre 250 et 1 750 ampères. Aucun autre dispositif électronique actuellement connu ne peut fournir une chute de tension aussi faible.

(1) HULL (de la General Electric). Fundamental Processes in Gaseous Tube Rectifiers. *Electrical Engineering*, août 1950.

CHAPITRE XII

LE PLASMATRON

118. — Généralités.

Pour terminer cette étude générale sur les tubes à atmosphère gazeuse nous décrirons brièvement la construction et le comportement du « Plasmatron ».

Le « Plasmatron » c'est un tube d'une conception nouvelle, qui n'est encore qu'au stade expérimental. La description en a été donnée par E. O. JOHNSON dans le numéro d'Electronics paru en mai 1951.

Les tubes à gaz décrits dans cet ouvrage présentent l'inconvénient d'avoir une caractéristique discontinue : on peut dire que l'électrode de contrôle n'agit que dans un sens. Elle permet d'amorcer le passage du courant mais cesse d'agir dès que cet amorçage est obtenu.

Il serait évidemment intéressant de disposer d'un élément à faible impédance intérieure, dans lequel l'action de l'électrode de contrôle soit continue, c'est-à-dire permette d'obtenir aussi bien une augmentation qu'une diminution d'intensité de courant.

C'est précisément ce qu'on peut obtenir avec le *Plasmatron*.

Les tubes à vide permettent d'obtenir facilement une amplification en tension. Une variation de tension dans le circuit de grille entraîne une variation de tension plus importante dans le circuit d'anode. Mais ce n'est qu'indirectement qu'on peut obtenir une amplification d'intensité.

Nous verrons que le « Plasmatron » donne facilement ce résultat. Une variation d'intensité de 2 milliampères dans le circuit de la cathode auxiliaire entraîne une variation d'intensité de 200 milliampères dans le circuit anodique...

Il s'agit donc bien d'un élément nouveau. Il serait prématuré d'en vouloir délimiter les applications. Nous nous bornerons, par conséquent, à en indiquer le principe de fonctionnement.

119. — Origine du nom.

Plasmatron vient évidemment de « Plasma ». Nous savons qu'on désigne par ce terme une région d'une décharge gazeuse dans laquelle la densité ionique est très grande et qui présente, par unité de volume autant de charges négatives (électrons) que de charges positives (ions gazeux).

La présence de ces charges électriques séparées fait qu'un plasma est bon conducteur de l'électricité. Entre deux électrodes présentant une différence de potentiel, il y a nécessairement un *champ électrique*. Il en résulte que les charges mobiles, soumises à une force se mettent en mouvement. Ce mouvement, de sens contraire pour les charges de signe opposé, correspond à un déplacement d'électricité c'est-à-dire à un courant électrique.

En réalité la presque totalité du courant est due au déplacement des charges négatives (électrons) qui sont beaucoup plus rapides. Mais la présence des ions positifs supprime la charge d'espace. Il devient alors possible de rassembler un grand nombre d'électrons dans un volume donné. Ainsi, la chute de tension, est faible, même pour des fortes intensités de courant.

120. — Construction.

La construction du tube est indiquée figure 79. Il y a deux cathodes chaudes. La première, la cathode auxiliaire qui ne fournit qu'une intensité relativement faible est chargée d'entretenir la

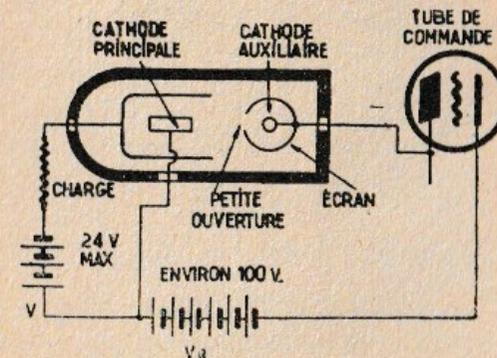


FIG. 79

décharge productrice de plasma, entre la cathode auxiliaire et la cathode principale.

Il faut donc que la tension V_a soit supérieure à la tension minimum d'ionisation du gaz contenu dans la lampe. Dans le

cas présent, il s'agit d'hélium. De plus, il faut tenir compte de la chute de tension dans le tube de commande. C'est pourquoi une tension d'une centaine de volts est nécessaire.

L'ionisation entretenue localement dans la région des électrodes principales est sous le contrôle direct du courant électronique fourni par la cathode auxiliaire dans un écran percé d'une petite ouverture. On augmente ainsi artificiellement la chute de tension dans la décharge auxiliaire. Les électrons qui fournissent le plasma sont plus rapides et, par conséquent, plus efficaces.

Grâce à cette disposition, on peut obtenir que la densité ionique soit très sensiblement proportionnelle à l'intensité du courant de cathode auxiliaire. Or, l'intensité fournie par la cathode principale est, elle même, proportionnelle à la densité ionique. Les caractéristiques du tube sont ainsi pratiquement linéaires.

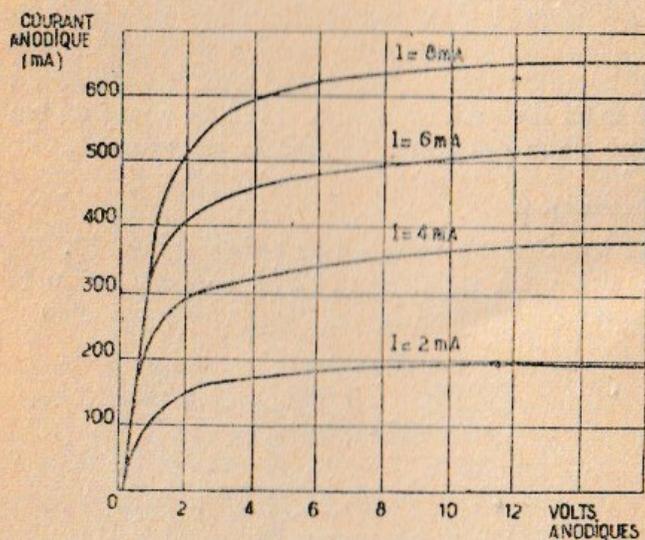


FIG. 80

121. — Courant cathodique. Tension anodique.

La cathode principale doit être construite pour débiter sans dommage le courant maximum. Dans le modèle expérimental de « Plasmatron », cette cathode présentant une surface de 3 centimètres carrés. Elle était du type classique à oxyde mixte de baryum/strontium.

La tension effectivement appliquée à l'anode doit être nécessairement inférieure au potentiel d'ionisation du gaz. S'il en était autrement, une décharge se produirait directement entre

anode et cathode et aucun contrôle ne serait possible. Dans le cas étudié cette tension doit être inférieure à 24 volts.

D'ailleurs, avec une tension plus élevée, le bombardement ionique auquel est soumis la cathode ne tarderait pas à désagréger les matières émissives.

122. — Caractéristiques.

Nous donnons figure 80 un réseau de caractéristiques fournissant le courant anodique en fonction de la tension appliquée entre cathode principale et anode. Les différentes courbes correspondent à des valeurs différentes du courant de cathode auxiliaire.

On notera que ces courbes ont l'allure d'un réseau correspondant à un tube penthode. Cette analogie n'est qu'apparente

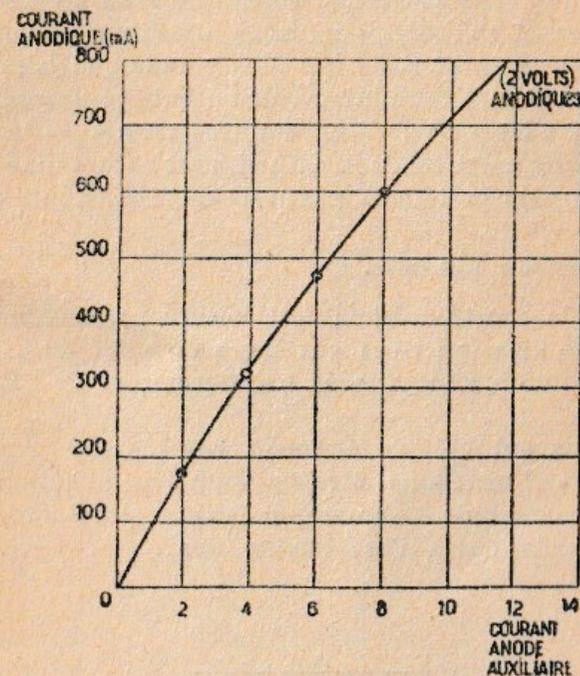


FIG. 81

puisque le paramètre auxiliaire n'est pas la tension de commande mais l'intensité de commande.

Ces courbes traduisent le fait que le courant d'utilisation varie très peu avec la tension anodique.

Si l'on peut voir une parenté évidente entre les courbes de la figure 80 et des courbes I_p/V_p , on peut ainsi tracer un graphique

comparable à une caractéristique I_p/V_g (fig. 81). On vérifie aisément que la commande d'intensité est presque linéaire.

123. — Influence de la fréquence.

On constate que le domaine d'utilisation du tube est limité aux fréquences relativement basses. Le gain en intensité est pratiquement constant jusqu'à 5 000 c/s. Entre 5 000 et 10 000 c/s, se produit une baisse d'efficacité peu considérable. Au-delà de 10 kilocycles/s, cette chute s'accroît et le tube est pratiquement inutilisable au-delà de 12 kc/s.

Ces remarques ne doivent pas nous étonner car les phénomènes ioniques présentent toujours une certaine inertie. L'intensité de courant est ici contrôlée par la densité ionique. Or, la variation de densité ionique ne saurait se concevoir sans un déplacement des ions. Ceux-ci sont des particules d'hélium présentant une masse de plusieurs milliers de fois plus grande que celle des électrons. De plus, il faut faire intervenir ici le libre parcours moyen des particules c'est-à-dire, — en d'autres termes — la pression. Enfin la distance entre les deux cathodes est encore une grandeur qui intervient pour la détermination de cette constante de temps.

124. — Applications possibles.

Puisque le fonctionnement est encore correctement assuré au-delà de 10 kc/s, on peut envisager l'emploi du plasmatron pour l'alimentation directe, sans transformateur de liaison, d'un haut parleur.

Les essais ont été parfaitement concluants.

Le dispositif peut aussi être employé avec avantage dans les systèmes de commande automatique des moteurs (servo-commande), dans certains types d'oscillateurs, etc...

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	5
CHAPITRE I. — Ionisation	6
2. Généralités. — 3. Ionisation. — 4. Explication électronique. — 5. Tension et travail d'ionisation. — 6. Excitation et ionisation. — 7. Oscillations du plasma. — Inversion du gradient de potentiel. — 9. Coexistence des différentes causes d'ionisation. — 10. Ionisation double, triple. — 11. Phénomènes lumineux. — 12. Agents ionisants. — 13. Action des différents facteurs. — 14. Etude directe de l'ionisation. — 15. Désionisation.	
CHAPITRE II. — Décharge dans les gaz	17
16. Etincelle. — 17. Distance explosive. — 18. Influence de la pression. — 19. Loi de Paschen. — 20. Tension d'amorçage et de désamorçage. — 21. Aspect de la décharge lumineuse. — 22. Répartition des tensions dans le tube. — 23. Mécanisme d'amorçage et d'entretien de la décharge. — 24. Caractéristique Intensité/Tension. — 25. Chute cathodique normale. — 26. Définition de l'arc.	
CHAPITRE III. — Les tubes à cathode froide	26
a) <i>Tubes à décharge luminescente</i>	<i>26</i>
27. Généralités. — 28. Tubes régulateurs. — 29. Utilisation pratique. — 30. Tubes en parallèle. — 31. Tubes en série. — 32. Tension de référence pour alimentation stabilisée. — 33. Production d'oscillations. — 34. Redresseurs de courant à cathode froide.	
b) <i>Tubes à arc dans la vapeur de mercure</i>	<i>33</i>
35. Généralités. — 36. Fonctionnement. — 37. Mécanisme de production et d'entretien de la décharge. — 38. Electrodes d'entretien. — 39. Redresseurs de grande puissance. — 40. Puissance maximum.	

CHAPITRE IV. — Tubes à électrodes de contrôle et à cathode froide	39
41. Généralités. — 42. Action d'une grille placée dans un plasma. — 43. Tube avec grille de contrôle. — 44. Exemple de réalisation : le « grid glow » tube. — 45. Tubes à « starter ».	
<i>CARACTÉRISTIQUES DES TUBES TRIODES A CATHODE FROIDE</i>	44
<i>CARACTÉRISTIQUES DES TUBES RÉGULATEURS</i>	45
CHAPITRE V. — Diodes à cathode chaude et à atmosphère	46
46. Généralités. — 47. Neutralisation de la charge d'espace. — 48. Conditions d'amorçage d'un arc électrique. — 49. Tubes à haute pression. — 50. Danger d'arc inverse. — 51. Régulation : caractéristique d'arc. — 52. Exemple : tube « Tungar ». — 53. Tubes à basse pression. — 54. Cathodes à écran thermique. — 55. Cathode à blindage thermique. — 56. Intensité limite — Oscillations — Surtensions. — 57. Puissance maximum et température. — 58. Arc inverse. — 59. Données limites — Tension inverse de pointe. Intensité maximum de pointe. Intensité moyenne, etc.... — 60. Précautions générales d'emploi.	
<i>CARACTÉRISTIQUES DES REDRESSEURS A VAPEUR DE MERCURE ET A GAZ RARE</i>	56 et 57
<i>REDRESSEURS A BASSE TENSION ANODIQUE</i>	58 et 59
CHAPITRE VI. — Les thyratrons	60
61. Généralités. — 62. Principe des tubes thyratrons. — 63. Rapport de commande. — 64. Principes de construction. — 65. Thyratrons avec tension de commande positive. — 66. Thyratrons tétrode, à grille écran, ou à grille blindée. — 67. Circuit équivalent à un thyatron. — 68. Commande par condensateur en parallèle. — 69. Réalisation de l'interrupteur. — 70. Variante du montage. — 71. Commande par condensateur en série. — 72. Emploi d'un thyatron de décharge.	
<i>CARACTÉRISTIQUES DES THYRATRONS TRIODES A VAPEUR DE MERCURE</i>	72
<i>CARACTÉRISTIQUES DES THYRATRONS TRIODES A GAZ</i>	73
<i>CARACTÉRISTIQUES THYRATRONS TÉTRODES A VAPEUR DE MERCURE</i>	73
<i>CARACTÉRISTIQUES THYRATRONS TÉTRODES A GAZ</i>	73

CHAPITRE VII. — Production d'oscillations	74
73. Généralités. — 74. Oscillations de relaxation. — 75. Limites de fréquence. — 76. Protection du thyatron. — 77. Production d'une tension en dents de scie linéaire. — 78. Systèmes à intensité constante.	
<i>Transformation du courant continu en courant alternatif</i>	79
79. Généralités. — 80. Emploi d'un seul thyatron. — 81. Montage à autoexcitation (Blocking oscillator). — 82. Convertisseurs symétriques. Circuit à contrôle parallèle. — 83. Montages à auto-excitation. — 84. Circuits avec thyratrons en série.	
CHAPITRE VIII. — Le thyatron comme redresseur	87
85. Généralités. — 86. Caractéristique d'amorçage en courant alternatif. — 87. Commande par tension continue. — 88. Commande par courant alternatif. — 89. Dispositif de variation de phase avec transformateur de grille. — 90. Redressement des deux alternances. — 91. Emploi des tensions polyphasées. — 92. Commande par tube à vide.	
CHAPITRE IX. — Moteurs électriques et thyratrons	96
93. Généralités. — 94. Moteur à courant continu. — 95. Disposition schématique et fonctionnement. — 96. Alimentation en courant alternatif. — 97. Alimentation par courant redressé. — 98. Moteur dit « synchrone ».	
<i>Quelques autres applications</i>	101
99. Généralités. — 100. Régulateur automatique d'anesthésie. — 101. Régulateur automatique de température — 102. Redresseur à tension stabilisée. — 103. Réglage de tensions alternatives. Réglage de lumière. — 104. Soudure électrique. — 105. Amplificateur pour servo-commande.	
CHAPITRE X. — Les ignitrons	107
106. Généralités. — 107. Principe. — 108. Mécanisme d'allumage. — 109. Production de l'impulsion d'allumage. — 110. Construction des ignitrons. — 111. Caractéristiques de fonctionnement. — 112. Caractéristiques des circuits d'allumage. — 113. Capacité de surcharge. — 114. Groupement des ignitrons. — 115. Emploi des ignitrons. Comparaison avec les thyratrons.	

CHAPITRE XI. — Emploi d'autres vapeurs métalliques que le mercure	116
116. Généralités. — 117. Emploi de la vapeur de caesium.	
CHAPITRE XII. — Le plasmatron	118
118. Généralités. — 119. Origine du nom. — 120. Construction. — 121. Courant cathodique. Tension anodique. — 122. Caractéristiques. — 123. Influence de la fréquence. — 124. Applications possibles.	