

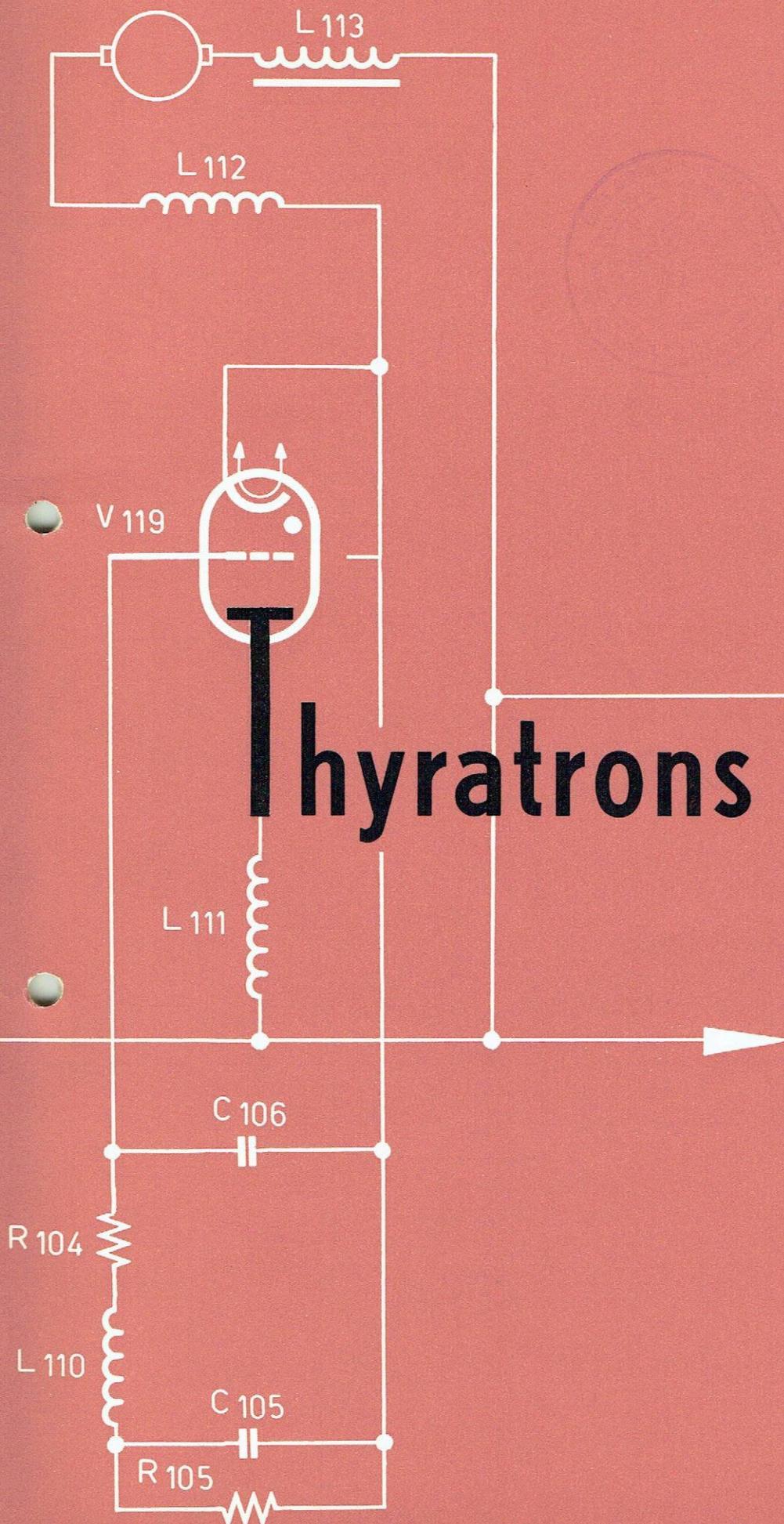
généralités  
conditions  
d'utilisation

# Thyratrons

# ADZAM

s/a Manufacture  
Belge de Lampes et de  
Matériel Electronique

80 rue des Deux-Gares  
Bruxelles 7 (Belgique)





26 MARS 1989

# LES THYRATRONS

---

édité par le  
**Bureau de Documentation Technique**  
de la s/a Manufacture Belge de Lampes et  
de Matériel Electronique  
**division électronique**  
80 rue des Deux-Gares  
Bruxelles 7  
Tél. 21.82.00 (20 l.)

# PRÉFACE

L'objectif du présent ouvrage s'étend à toutes les applications principales des thyatron. On a choisi à cet effet les dispositions de circuits que l'on peut adapter, le plus facilement, à un grand nombre de projets. Les dispositifs électroniques les plus variés peuvent ainsi être établis complètement par l'étude des données du texte, des figures et des tableaux.

Tout le développement repose sur un thème simple :

Le capteur industriel, correctement choisi, produit des signaux électriques qui correspondent à des données photométriques ou thermiques (cellules photo-électriques), à des fréquences élevées que l'on transforme en courant continu (couples thermo-électriques), à des radiations (compteurs de Geiger Müller). Les signaux des capteurs qui traduisent un flux lumineux, une pression, une variation de résistance électrique, une force, une vitesse, une accélération, une humidité relative, actionnent finalement des servo-commandes grâce à l'intervention de thyatron, après amplification, différenciation, intégration... de signaux bien définis.

Les spécifications des thyatron industriels indiquent l'ensemble des caractéristiques électriques et des principales valeurs à ne pas dépasser.

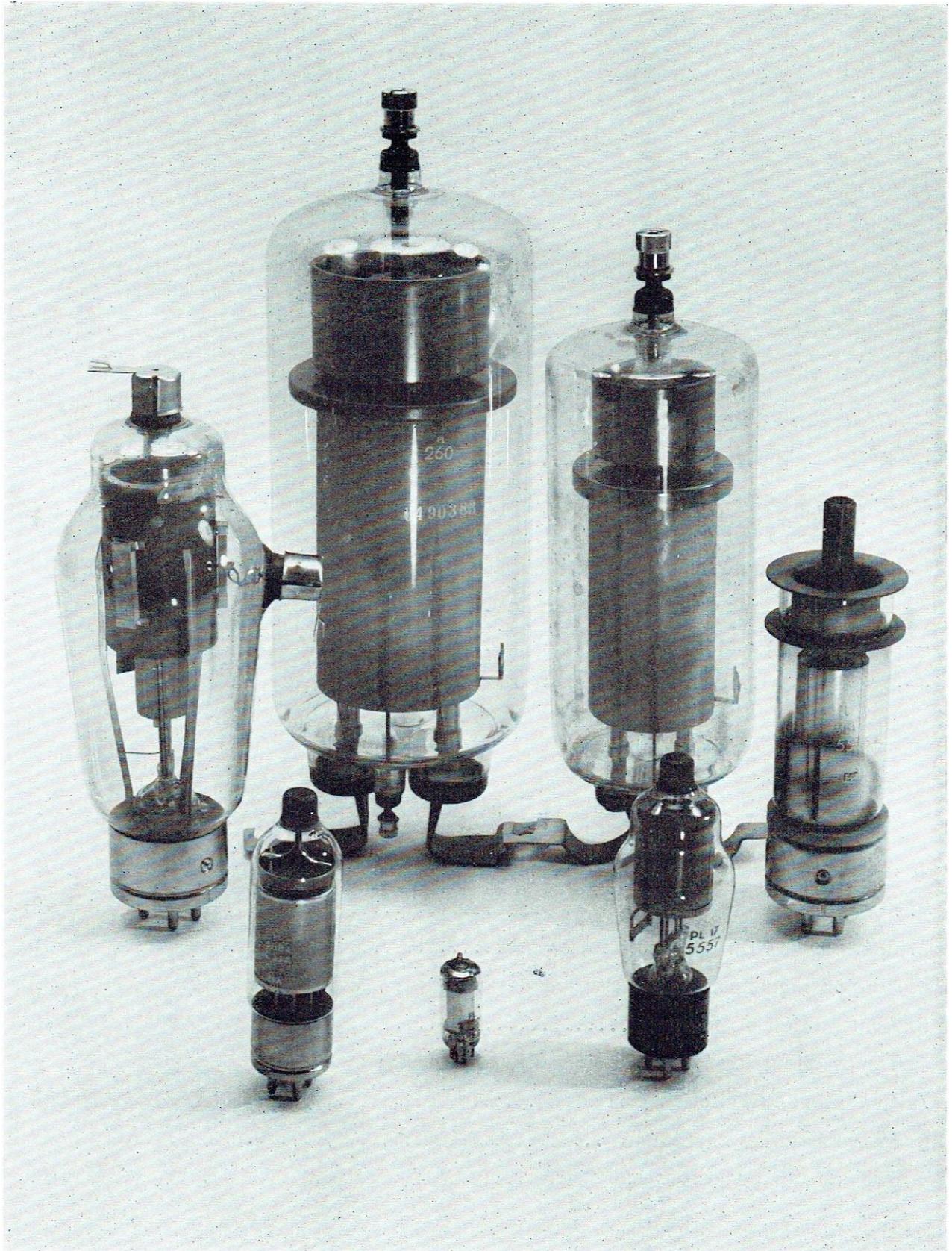
Ces indications sont déjà très précieuses pour le constructeur. Il devra toujours s'y reporter avant d'établir ses projets de fabrications et les examiner à nouveau lors de la mise au point ou du réglage définitif des appareils.

En général, les puissances d'utilisation des thyatron étant relativement grandes, les considérations usuelles de la technique des courants forts doivent intervenir en toute rigueur. Mais il convient, tout spécialement, de ne pas négliger pour autant les différents aspects du fonctionnement électronique et ionique des thyatron. Or, on ne connaît pas de monographie moderne sur ce sujet.

Nous espérons donc que les interprétations détaillées des caractéristiques, réunies à l'intention des constructeurs dans la deuxième partie de ce volume seront consultées, plutôt que lues à la suite, avec toute l'attention nécessaire.

Le contenu de cette documentation montre que des mesures et des calculs faciles permettent de suivre « à la lettre » des données toujours un peu résumées, mais selon toutes les modalités de l'adaptation du montage au tube choisi. On y trouvera aussi le détail des précautions à prendre dans les différents circuits, ainsi que de courtes études, résolument simplifiées, du facteur de commutation et des montages amortisseurs, dont l'emploi se généralise heureusement dans tous les systèmes polyphasés.

Le tableau des thyatron industriels, à la fin de l'ouvrage, résume toutes les prescriptions et complète parfois certaines données antérieures.



# SOMMAIRE

---

## I<sup>re</sup> Partie

### LES EMPLOIS DES THYRATRONS

— Généralités .....	1
— Régimes de fonctionnement .....	3
— Montages pratiques employés pour la commande de l'angle d'amorçage de grille avec alimentation du thyatron en courant alternatif .....	7
— Principaux capteurs utilisés dans l'industrie .....	10
— Utilisation des thyratrons .....	16
— Exemples de montages .....	21
— Applications industrielles des thyratrons .....	25

## II<sup>e</sup> Partie

### SPÉCIFICATIONS ET CONSEILS POUR L'EMPLOI DES THYRATRONS

1. Choix des thyratrons .....	29
2. Spécifications de la tension d'anode .....	29
3. Spécifications du courant anodique .....	31
4. Tension maximale de polarisation de la grille .....	32
5. Alimentation du filament .....	36
6. Temps d'ionisation et de désionisation (fréquence max.) .....	37
7. Conditions d'utilisation correctes .....	38
8. Mesures sur les thyratrons .....	42
Tableau des thyratrons industriels .....	48

# LES EMPLOIS DES THYRATRONS

## GÉNÉRALITÉS

Un thyatron est un tube électronique à remplissage gazeux, qui contient une cathode chauffée, une ou plusieurs grilles et une anode. Le remplissage gazeux donne au thyatron des propriétés particulières qui interviennent fortement dans son mode de fonctionnement, lequel diffère considérablement de celui des tubes à vide. Les plus profondes différences consistent dans le fort courant cathodique et dans la faible résistance interne du tube à gaz. De ce fait, les thyatrons occupent une place très importante dans les équipements d'électronique industrielle.

### Détails de construction.

Comparés aux tubes à vide, les thyatrons présentent de nombreux détails de construction intéressants. On examinera donc la construction d'un thyatron triode à gaz rare (voir la figure 1).

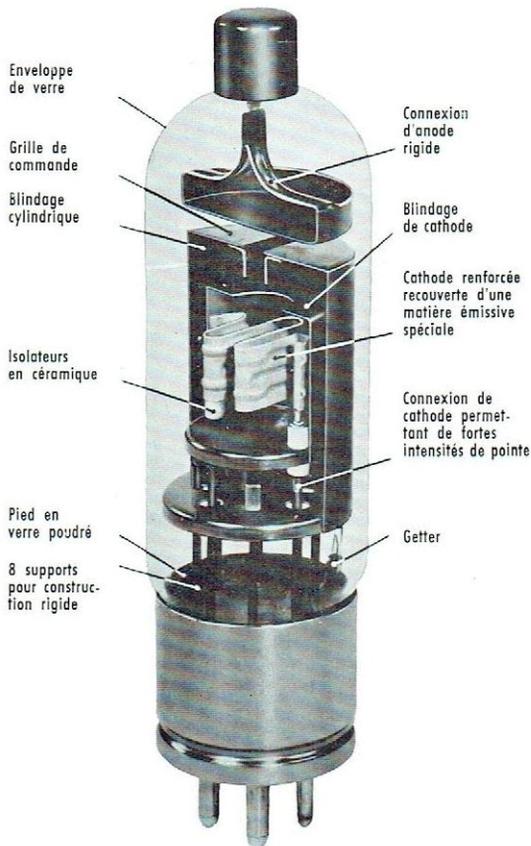


Fig. 1. — Coupe d'un thyatron.

L'enveloppe est généralement une ampoule en verre spécial, dont la résistance aux chocs a été sérieusement prouvée, par la pratique industrielle. La construction en verre est ainsi notablement moins coûteuse que celle en enveloppe métallique.

L'anode A est faite de métal ou de graphite. La construction de l'anode doit être étudiée pour que la chaleur s'y dissipe rapidement afin d'éviter la possibilité d'amorçage inverse. L'un des moyens employés pour accroître la dissipation thermique maximum, et pour abaisser, en conséquence, la température de l'anode, consiste à noircir sa surface. La cathode est recouverte d'oxydes, et assure, ainsi, une très forte émission électronique. Elle peut être à chauffage direct ou indirect. La construction de la cathode d'un thyatron diffère sensiblement de celle d'un tube à vide, en raison du remplissage par un gaz, ou par de la vapeur de mercure. Car, lorsque le gaz devient ionisé, la trajectoire électronique n'est plus, obligatoirement, une ligne droite, ce qui permet de spiraler le filament émetteur et d'obtenir une importante réduction des pertes calorifiques.

De plus, les cathodes à chauffage indirect sont généralement entourées d'un écran thermique (voir la figure 3) qui consiste en un certain nombre de cylindres métalliques concentriques.

Comme le courant d'anode doit traverser la cathode, les thyatrons les plus puissants sont munis, en règle générale, d'une cathode à chauffage indirect car un ensemble avec filament serait, dans ce cas, trop volumineux.

Le type de la cathode employée, et ses dimensions, déterminent le temps de chauffage de cathode. Les cathodes à chauffage direct nécessitent, en général, un temps de préchauffage très court alors que les cathodes à chauffage indirect prennent un temps plus long pour atteindre la température prescrite, celle où l'émission devient complète. De plus, dans le cas des thyatrons à vapeur de mercure, il faut tenir compte du temps d'échauffement du tube, car les conditions de travail ne sont remplies, qu'à partir du moment où la pression de vapeur atteint une valeur déterminée. L'évaporation du mercure est amenée par la chaleur rayonnée de la cathode. Le temps nécessaire dépend donc de la température ambiante et des dimensions du tube.

Dans les thyatrons tétrodes, la grille-écran  $g_2$  comprend plusieurs diaphragmes, entourés par un cylindre. La grille de commande est ainsi blindée vis-à-vis de la cathode, aussi bien que vis-à-vis de

l'anode. Entre autres fonctions, la grille-écran empêche le dépôt, sur la grille de commande, de matières émises provenant de la cathode, et réduit la température de la grille de commande. Elle agit, aussi, en effet, comme un écran thermique. La partie cylindrique de la grille-écran entoure l'espace de décharge tout entier et évite que la décharge soit influencée par des charges électrostatiques quelconques sur la paroi de verre, charges qui peuvent y être engendrées par les ions du gaz ou de la vapeur de mercure. Par ces moyens, on obtient une grande stabilité de fonctionnement.

### Principes de fonctionnement.

Si l'on applique à la grille du thyatron une tension suffisamment négative, aucun courant anodique ne circule (fig. 2) et, même si la tension d'anode est

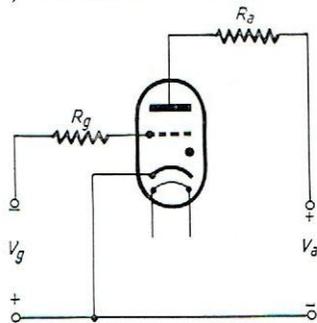


Fig. 2. — Principe fondamental d'un montage à thyatron. augmentée jusqu'à plusieurs centaines de volts, le tube reste encore *non-conducteur*. Lorsqu'on rend la grille graduellement moins négative, on atteint un point où le tube s'amorce brusquement et où il se produit un courant d'anode extrêmement fort. La valeur de ce courant est principalement déterminée par la résistance du circuit anodique et par la valeur de la tension qui alimente l'anode. La tension de l'anode du thyatron amorcé, appelée aussi *tension d'arc*, est indépendante du courant anodique et n'a qu'une faible valeur (une dizaine de volts, environ). A ce moment, le thyatron fonctionne comme un redresseur à remplissage gazeux qui n'aurait pas de grille. La caractéristique courant-tension d'un tube à décharge dans un gaz étant négative, il est absolument nécessaire d'insérer une résistance, de valeur correcte, dans le circuit d'anode ou dans le circuit de cathode, pour éviter la détérioration du tube par un courant excessif.

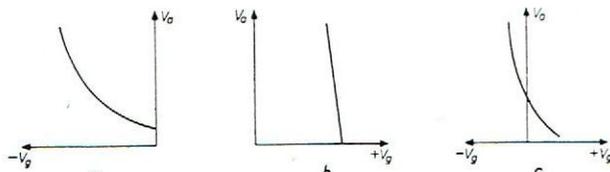


Fig. 3. — Les différentes caractéristique de commande des thyatrons : a = négative, b = positive, c = mixte.

La tension négative de grille pour laquelle les tubes s'amorcent, appelée *tension d'amorçage*, dépend de la valeur de la tension positive de l'anode. Cette relation, entre la tension de l'anode et la tension d'amorçage, est représentée le plus fréquemment par une courbe appelée *caractéristique de commande critique du tube*. L'action de la grille sur le phénomène d'amorçage du tube dépend de sa forme et de sa position. Ce fait s'explique bien si l'on observe l'allure de la caractéristique de commande. Certains thyatrons ont une caractéristique négative, pour d'autres, elle est positive, pour d'autres encore, elle est mixte (positive ou négative), selon la valeur de la tension de grille nécessaire pour provoquer l'amorçage du tube (fig. 3).

Il convient de bien noter que lorsqu'un thyatron a été amorcé, il ne peut plus être éteint par une augmentation de la tension négative de grille. Dans un thyatron amorcé, une gaine, formée par les ions positifs du gaz, blinde la grille et lui fait perdre son action de commande sur le tube. Par conséquent, le courant anodique va continuer à circuler, jusqu'au moment où la tension entre l'anode et la cathode peut descendre à une valeur inférieure à la tension d'arc.

Si l'on désire que le tube ne s'amorce pas de nouveau, lorsque la décharge a été interrompue, il convient de prendre des précautions pour éviter que la tension de l'anode atteigne de nouveau sa pleine valeur avant qu'une période de temps bien déterminée se soit écoulée. Ce temps nécessaire est le *temps de désionisation*. C'est la durée exigée par la grille pour retrouver ses possibilités d'action sur le fonctionnement du tube. Elle commence à l'instant où le courant anodique cesse de circuler. Les petits thyatrons, remplis de gaz rare, tels que le type PL 5727 ou le type 2 D 21 présentent des temps de désionisation extrêmement courts, de l'ordre de quelques microsecondes. Ils conviennent donc pour l'emploi sur des montages fonctionnant sur des fréquences relativement élevées.

A côté des thyatrons *triodes*, c'est-à-dire des thyatrons ne comportant qu'une seule grille, on fabrique également des thyatrons *tétraodes* (à deux grilles, l'une servant de grille de commande et l'autre de grille-écran). Les thyatrons tétraodes sont presque toujours des thyatrons de faible puissance. Leur emploi est avantageux car ils présentent un courant de la grille de commande très faible et une capacité entre l'anode et la grille de commande relativement petite. Il est possible de modifier leur caractéristique de commande grâce à un réglage de la tension de la grille-écran. L'adjonction de cette grille-écran permet d'obtenir une réduction très importante du courant de la grille de commande, lequel n'atteint, en effet, que quelques micro-ampères lorsque le tube n'est pas amorcé. Cette propriété est vraiment intéressante.

sante car elle permet d'employer ces tubes dans des montages comportant une *résistance de grille de forte valeur*. Lorsque le tube employé présente, à l'état non-conducteur, un courant de grille de commande élevé, ce courant produit une chute de tension importante aux bornes de la résistance du circuit de la grille 1, ce qui peut provoquer un déplacement non contrôlable du *point d'amorçage* et peut diminuer la sécurité du fonctionnement de l'installation. Dans de

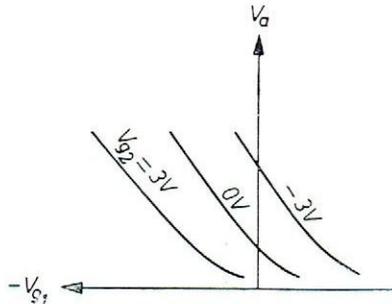


Fig. 4. — Caractéristiques de commande d'un thyatron tétrode.

## RÉGIMES DE FONCTIONNEMENT DES THYATRONS

L'amorçage d'un thyatron est provoqué, soit par l'augmentation de la tension d'anode au-dessus de la tension d'amorçage, soit par une diminution de la

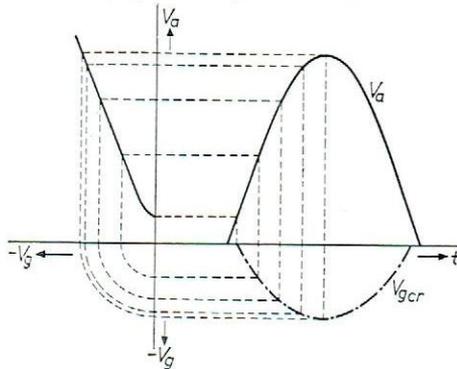


Fig. 5. — La caractéristique de grille critique ( $V_{gcr}$ ) peut être déduite graphiquement de la caractéristique de commande, dès que l'on connaît la forme et l'amplitude de la tension d'anode,  $V_a$ .

polarisation de grille négative. Cela peut être graphiquement représenté, sur la caractéristique de grille critique. Celle-ci peut être tracée à partir de la caractéristique de commande, comme on le montre à titre d'exemple, à la figure 5.

Les figures 6 a et b, montrent la tension d'anode  $V_a$ , la polarisation négative de grille  $V_g$  et la caractéristique de grille critique  $V_{gcr}$  (tracée en traits mixtes), en fonction du temps, pour le cas où l'anode est alimentée sous une tension continue.

Il est évident que la caractéristique critique de grille est une ligne droite, si la tension d'anode est

telles conditions d'utilisation, on donne toujours la préférence aux thyatrons tétrodes. En raison de la faible capacité interne entre l'anode et la grille de commande, le circuit de l'anode n'exerce pratiquement aucune réaction sur le circuit de la grille. Par conséquent, cette structure du tube réduit beaucoup la possibilité d'un amorçage accidentel, causé par une impulsion de tension produite sur l'anode.

Les caractéristiques de commande peuvent être déplacées entre certaines limites, et c'est un autre avantage important des thyatrons tétrodes. On peut se servir pour cela de la tension de la grille-écran  $V_{g2}$  (fig. 4). Cette possibilité se révèle intéressante pour les montages spéciaux dans lesquels deux tubes, dont les caractéristiques diffèrent quelque peu doivent être associés. On peut aussi compenser, de cette manière, de petites variations éventuelles des caractéristiques du tube au cours du temps. Dans certains cas, enfin, la grille-écran (grille 2) peut être utilisée comme électrode de commande supplémentaire servant à l'amorçage du tube.

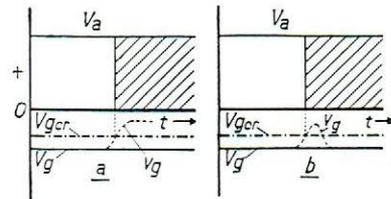


Fig. 6. — Fonctionnement d'un thyatron avec une tension continue à l'anode  $V_a$  et polarisation continue de grille  $V_g$ . La tension de grille critique, qui correspond à  $V_a$ , est  $V_{gcr}$ . — En 6 a - amorçage par réduction de polarisation. — En 6 b - amorçage par impulsion superposée à la polarisation. La surface hachurée correspond aux instants où le thyatron est conducteur.

constante. Si la tension de grille est augmentée, au-dessus du niveau de  $V_{gcr}$ , le thyatron s'amorce (voir  $V_g$  de la figure 6 a). Le temps de conduction est indiqué par la surface hachurée. Dans les applications au comptage, une impulsion brève de courant d'anode est tirée du tube soit par l'interruption du circuit d'anode, à l'aide des contacts d'un relais, ou par l'emploi d'un montage à relaxation. Dans ce cas, on doit appliquer une impulsion brève de tension grille (voir  $V_g$  de la figure 6 b).

La tension de grille doit baisser, au-dessous du niveau de  $V_{gcr}$ , avant que la tension d'anode ait repris sa valeur d'origine, car, sans cela, il y aurait réamorçage du tube.

Lorsque l'anode est alimentée sous une tension alternative sinusoïdale, la caractéristique de grille critique reprend une forme semblable à celle de la figure 7. Dans ce cas, le tube peut être amorcé par

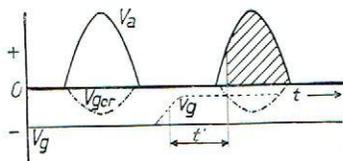


Fig. 7. — Fonctionnement d'un thyatron avec une tension d'anode alternative  $V_a$  et une polarisation continue de grille  $V_g$ . Thyatron amorcé par neutralisation partielle de polarisation (voir la courbe de  $v_g$ ). Une durée  $t'$  est nécessaire avant que l'amorçage se produise.

neutralisation, partielle, de la polarisation de grille, mais une durée,  $t'$ , s'écoule avant que l'amorçage ait lieu. L'extinction se produit automatiquement, car la tension d'anode tombe au-dessous de la tension d'arc durant les demi-périodes négatives.

Pour les applications à la commande à distance et à la régulation, on utilise fréquemment un thyatron fonctionnant comme redresseur commandé, ou deux thyatrons en montage tête-bêche pour la régulation de la puissance de sortie alternative. La puissance totale fournie par un thyatron peut ainsi être contrôlée par un dispositif de réglage à très faible puissance, si l'on fait varier le temps de passage effectif du courant, c'est-à-dire, si le courant n'est admis que pendant une fraction ou la totalité de chaque demi-période. Cela peut être obtenu, en faisant varier le point où le thyatron s'amorce. Plusieurs méthodes sont applicables pour obtenir ce résultat. Elles vont être brièvement passées en revue, ci-après.

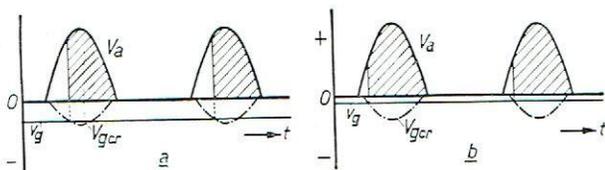


Fig. 8. — Commande d'un thyatron par variation de la polarisation de grille continue  $V_g$ .

Les figures 8 a et b montrent comment on fait varier les durées conductrices, par l'application d'une polarisation continue variable. Comme on le verra, elles peuvent seulement être réglées ainsi entre une demi-période et un quart de période.

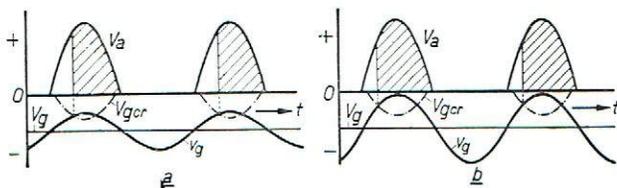


Fig. 9. — Commande d'un thyatron par tension alternative  $v_g$  de grille, variable, superposée à une polarisation continue  $v_g$ . La tension alternative de grille peut être en phase avec la tension alternative d'anode.

Il est possible également d'appliquer à la grille une tension alternative variable, superposée à une tension continue fixe de polarisation. (Voir les figures 9 a et b.)

La commande sur toute la demi-période peut être obtenue, par exemple, par l'emploi d'une tension alternative de grille, déphasée de  $90^\circ$ , et branchée en série avec une polarisation de grille variable.

Dans les figures 10 a et b, le point d'amorçage du thyatron varie avec le déphasage de la tension alternative de grille par rapport à la tension alternative d'anode  $v_a$ . Cette tension de grille est superposée à une tension continue constante de polarisation  $V_g$ . Si les amplitudes de la tension alternative de grille sont suffisamment grandes, les durées de conduction peuvent être commandées entre les demi-périodes et zéro. Cette méthode, qui est très largement utilisée dans la pratique, comporte un inconvénient.

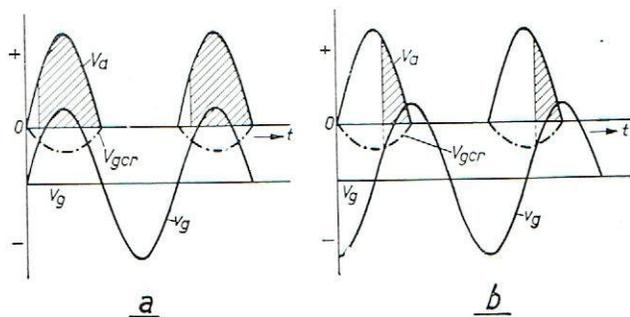


Fig. 10. — Commande d'un thyatron, par variation de phase de la tension alternative de grille  $v_g$ , superposée à une polarisation de grille continue  $V_g$ .

Lorsque la caractéristique de commande du thyatron subit une influence extérieure, telle que celle de la température, ou lorsque le thyatron est remplacé, le nouveau tube du même type ayant une caractéristique de commande un peu différente, on aura aussi une légère variation de la caractéristique de grille critique. La conséquence serait encore la même si la tension alternative d'anode n'était pas constante. Une variation de la caractéristique de grille critique produit un déplacement du point d'amorçage. Afin d'éviter cet effet, la valeur de pointe de la tension alternative de grille doit être plus élevée que la valeur minimum requise pour l'amorçage, valeur qui est déterminée par la caractéristique de grille critique.

L'inconvénient mentionné peut être éliminé si l'on applique une tension de grille alternative ayant un caractère d'impulsion, avec un bord frontal raide, au lieu d'une forme sinusoïdale pure (voir les figures 11 a et b). Une tension périodique de grille, de cette forme, peut aisément être obtenue à l'aide d'un transformateur à fer saturé.

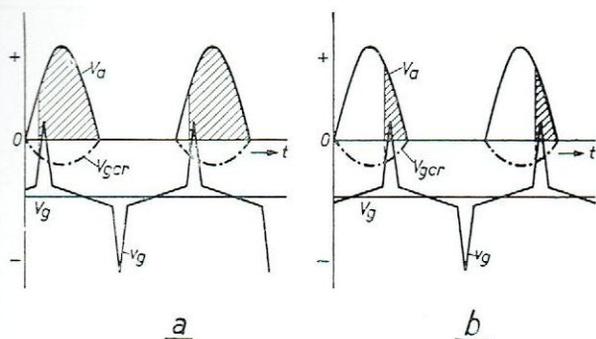


Fig. 11. — Commande d'un thyatron par déplacement de phase et production d'une impulsion de tension de grille  $V_g$  fournie par un transformateur spécial de pointes. Cette impulsion est superposée à une tension négative de grille  $V_g$ .

Dans certaines applications, aux temporisateurs par exemple, il est nécessaire de produire des amorçages ou des extinctions sur des fractions faibles de la période. On ne peut utiliser, pour cela, une tension alternative car, à la fréquence du secteur de 50 Hz, on risque d'introduire un retard maximum de 0,01 s, correspondant à la durée de l'alternance négative, durant laquelle le tube ne peut s'amorcer. Dans ce cas, il devient indispensable d'utiliser un courant continu.

## Méthodes d'extinction.

### a) Procédés mécaniques - Tensions d'anode continues et alternatives.

L'interruption du courant d'anode peut aussi être obtenue pour des impulsions assez larges, par des procédés mécaniques. La figure 12 en donne un exemple. Le thyatron commande ici un dispositif numérateur de comptage C, auquel se trouve accouplé un relais, *Rel.* Le contact supplémentaire S est donné, grâce au déplacement de l'armature A du relais, qui interrompt le courant d'anode.

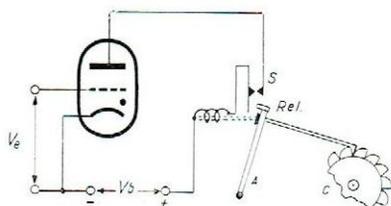


Fig. 12. — Procédé mécanique pour extinction de thyatron.  $V_b$  est la tension continue d'anode.

### b) Procédés électroniques - Alimentation d'anode en courant continu.

Lorsque l'on veut obtenir le contrôle de grille, par des impulsions non répétées, on délaisse généralement l'alimentation de l'anode en courant alternatif qui pourrait, dans ce cas, apporter un retard à la commande. Les procédés mécaniques ne sont pas d'un emploi pratique, dans ces cas particuliers. On préfère alors l'alimentation de l'anode sous une tension continue, fournie par un redresseur.

### Montage en bascule avec capacité en parallèle sur la charge (fig. 13).

Ce que l'on appelle couramment « commande en parallèle » de deux thyratrons correspond, plus exactement, à un fonctionnement en bascule. On suppose que  $T_1$  et  $T_2$  au début sont non-conducteurs.

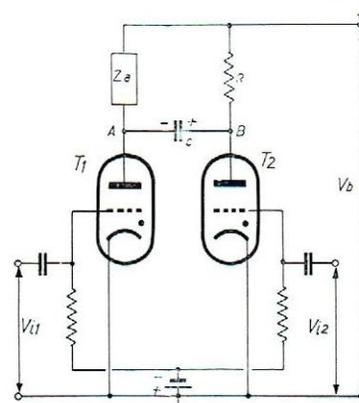


Fig. 13.

- On applique une impulsion ( $v_{i1}$ ). Le tube  $T_1$  s'amorce d'où un courant dans la charge  $Z_c$ .
- C se charge aux polarités marquées.
- L'impulsion suivante ( $v_{i2}$ ) est appliquée;  $T_2$  s'amorce et en conséquence la tension en B descend pratiquement à celle de la masse.
- C ne peut se décharger dans le court intervalle de temps imparti et la tension au point A tombe soudainement au-dessous de la tension d'extinction de  $T_1$  qui devient non conducteur.
- La charge de C s'inverse graduellement.
- L'impulsion suivante ( $v_{i1}$ ) amorce  $T_1$ , éteint  $T_2$ , etc.  $T_1$  sert donc de commutateur de mise en marche et  $T_2$  sert à éteindre  $T_1$ .

### c) Extinction en courant alternatif.

Nous mentionnons ici ce procédé. C'est l'un des plus usuels et il a déjà été étudié (page 4).

### d) Extinction par des procédés de relaxation.

### EXTINCTION PAR R et C

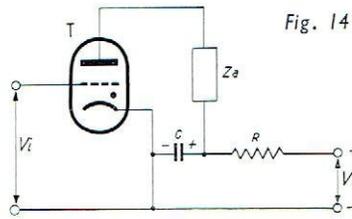


Fig. 14

- $T$  est d'abord éteint.
- $C$  se charge via  $R$  à la tension  $V_b$ .
- On applique l'impulsion  $v_i$  et  $T$  s'amorce.
- $T$  décharge  $C$  à travers  $Z_a$ .
- Si la constante de temps  $RC$  est assez grande, la source continue  $V_b$  ne peut fournir assez de courant à travers  $R$  pour compenser cette chute de tension.  $T$  s'éteint puis  $C$  se recharge, etc.
- Montage de valeur pratique faible, car une période de fonctionnement est toujours relativement longue. On préférera les montages des figures 15 et 16.

### EXTINCTION PAR L et C

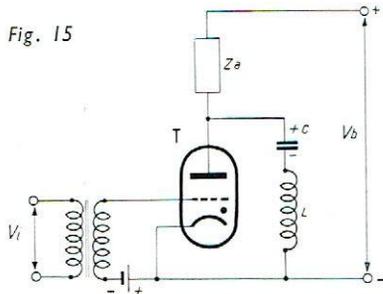


Fig. 15

- $T$  est d'abord éteint.
- $C$  se charge et l'impulsion  $V_i$  amorce  $T$ .
- $C$  se décharge dans  $T$  mais la branche  $LC$  a des propriétés oscillantes donc  $C$  commence à se décharger en sens inverse.
- Lorsque  $V_a$  tombe au-dessous de la tension d'extinction,  $T$  ne conduit plus.  $C$  se charge de nouveau à travers  $Z_a$ , et le cycle recommence.

### EXTINCTION PAR CAPACITÉ ET THYRATRON $T_2$

(Bascule et condensateur en série avec la charge.)

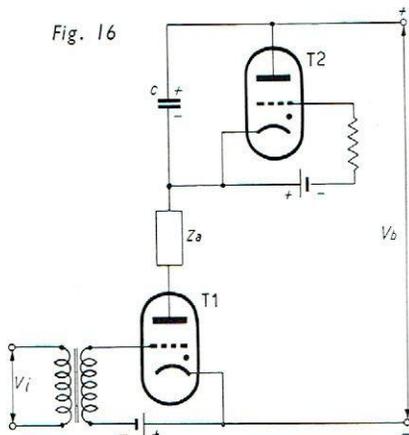


Fig. 16

- $T_1$  et  $T_2$  sont éteints.
- $v_i$  amorce  $T_1$  et le courant dans  $Z_a$  charge  $C$  aux polarités indiquées. Alors  $T_1$  s'éteint.
- La polarisation de  $T_2$  est réglée pour amorçage de  $T_2$  lorsque la tension sur  $C$  augmente.
- $C$  se décharge dans  $T_2$  qui s'éteint et l'impulsion suivante recommence le cycle.

Note. — Si l'on branche  $Z_a$  en série avec  $C$  aux bornes de  $T_2$ , on obtient un générateur de courant alternatif. Cette remarque prendra son intérêt pour l'étude des onduleurs (page 27).

### COMMANDE D'EXTINCTION PAR TENSION DE SENS CONTRAIRE

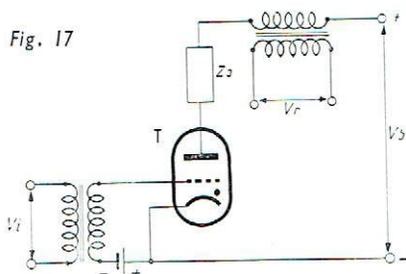


Fig. 17

- Une impulsion de tension  $v_i$  amorce  $T$ .
- On arrête le courant par une impulsion de tension de sens contraire  $v_r$ .
- $v_r$  réduit en effet la tension d'anode au-dessous de la valeur d'extinction. La durée de cette impulsion doit être supérieure au temps de désionisation du thyristor.

- Inconvénient du procédé : on doit fournir, pendant ce temps, assez d'énergie d'impulsion pour équilibrer l'alimentation normale d'anode.
- L'impulsion d'extinction peut, aussi, être fournie par un condensateur, dont la décharge rend, momentanément, négative l'anode du thyristor. En fait, cette augmentation de la tension d'arc était obtenue, à la figure 13, par l'action d'un autre thyristor.

## MONTAGES PRATIQUES

### EMPLOYÉS POUR LA COMMANDE DE L'ANGLE D'AMORÇAGE DE GRILLE AVEC ALIMENTATION DU THYRATRON EN COURANT ALTERNATIF

#### Signal de commande de grille.

En général, la grandeur qui détermine le fonctionnement d'un ensemble électrique est appliquée à un capteur ou « pick-up ». Cet organe transforme l'énergie, reçue sous l'une des formes connues, en un signal électrique que l'on pourra employer, selon divers montages, pour déplacer le point d'amorçage ou l'instant d'amorçage des thyratrons (voir page 6).

La grandeur servant à la commande est parfois disponible sous la forme d'une tension électrique. La plupart des montages de régulation de vitesse de générateurs ou d'alternateurs sont commandés par des tensions dépendant des vitesses, des couples, etc. S'il s'agit d'une commande de positionnement, l'angle, ou tout autre élément de référence de position, peut être converti en tension à l'aide d'un potentiomètre magnétique (synchro-détecteur), d'un

noyau ou d'une plaque mobile de condensateur.

On équilibre le plus souvent la grandeur de commande, ou sa tension de signal équivalente, par une tension de référence, de valeur telle, que la différence de tension entre la référence et le signal de commande des grilles soit grande devant les variations de la tension de grille critique du thyatron  $V_{gcr}$ .

La différence entre la grandeur de commande et la tension de signal doit parfois être amplifiée pour obtenir un signal de commande répondant à cette dernière condition. C'est notamment le cas, si, en l'absence d'amplification, on se trouvait obligé d'employer une source de tension de référence peu pratique (trop petite ou trop grande tension).

Dans l'établissement du projet, le réalisateur doit apporter un soin tout particulier à l'étude du circuit de grille, afin d'obtenir une commande précise.

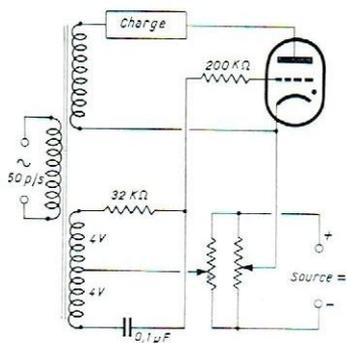


Fig. 18 A

#### Commande verticale.

On applique à la grille un signal sous forme de tension continue d'amplitude et de polarité variables et une petite tension fixe de « polarisation » alternative (fig. 18 A).

Les valeurs des éléments électriques conviennent pour un secteur à 50 Hz.

Si le montage est monophasé, une alternance, ou monophasé, deux alternances avec charge non inductive, la « polarisation » fixe alternative « optimum » doit présenter un retard de phase d'environ  $90^\circ$  sur la tension alternative d'anode (fig. 18 B).

Si le montage est à deux alternances avec charge inductive, la « polarisation » fixe alternative de grille peut être en phase avec la tension alternative d'anode.

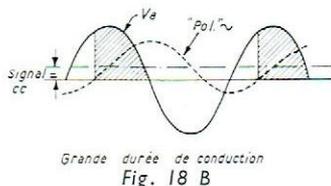
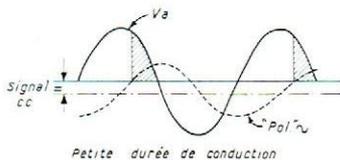
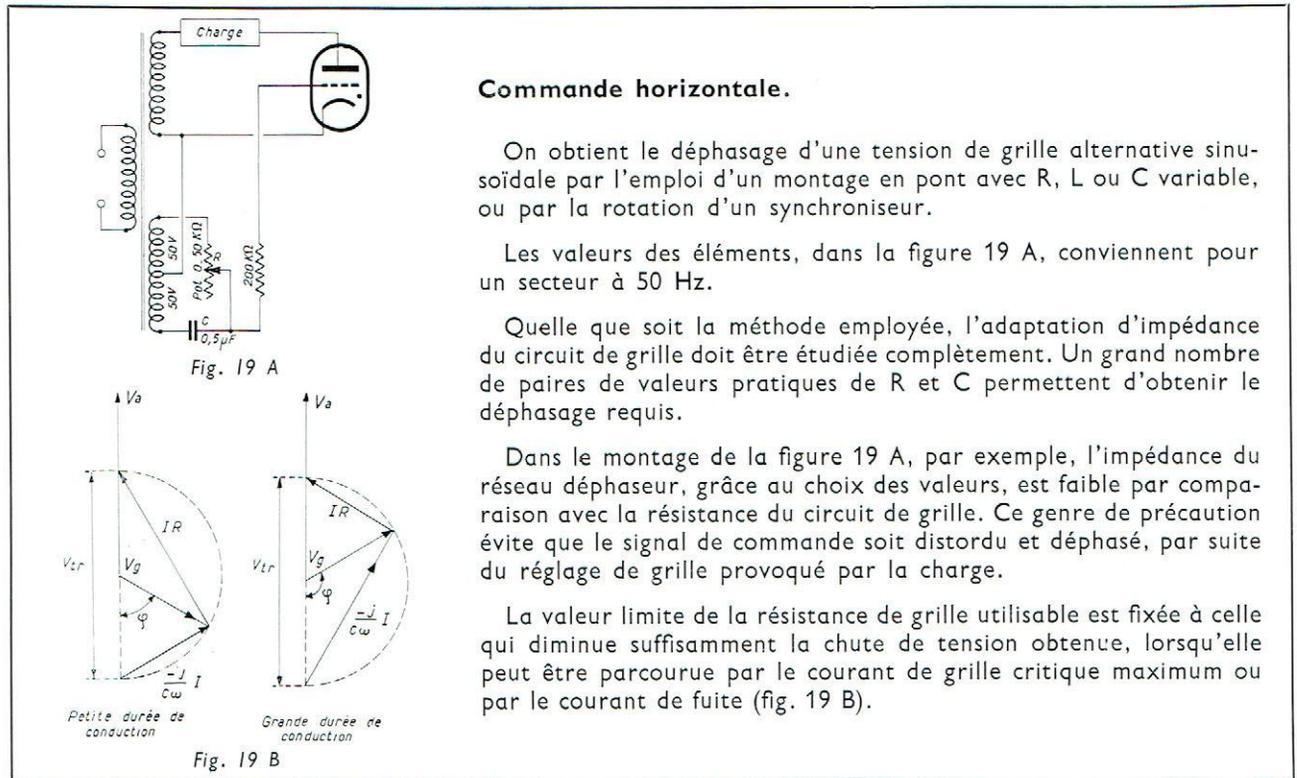


Fig. 18 B



### Commande horizontale.

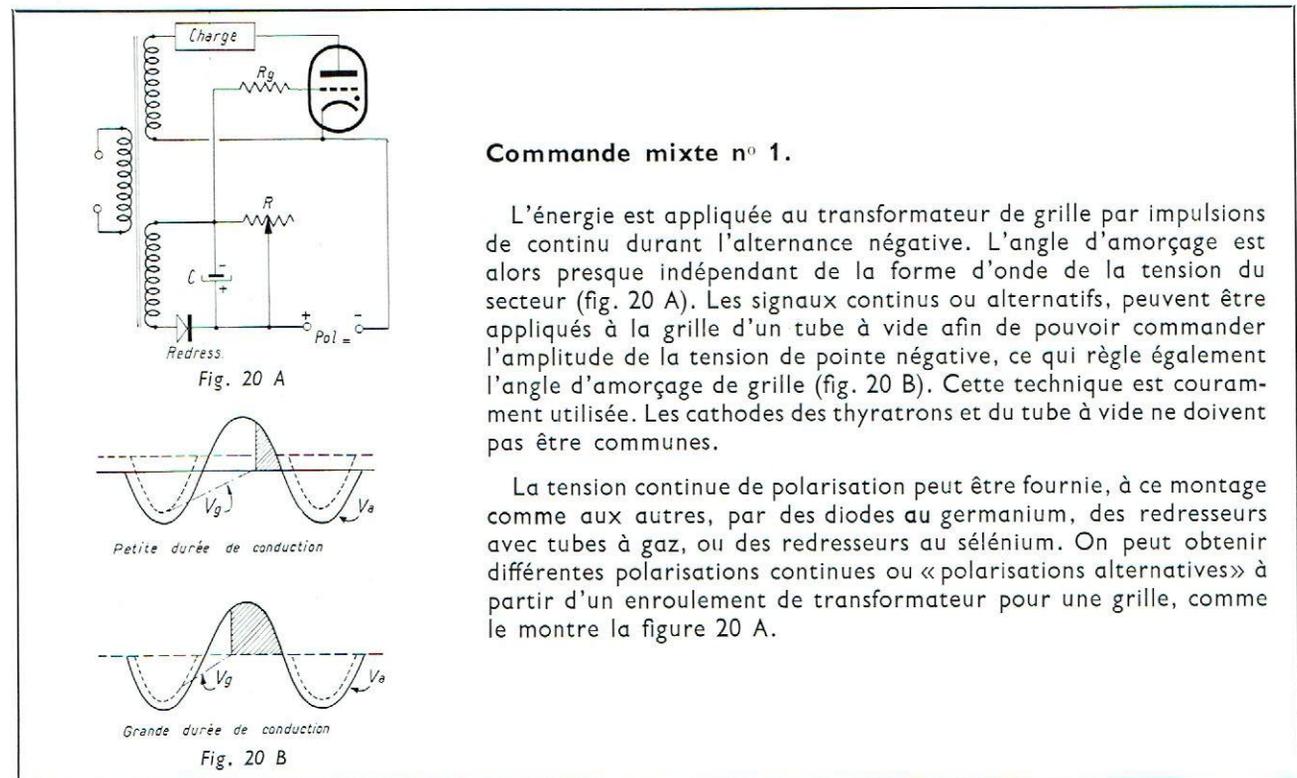
On obtient le déphasage d'une tension de grille alternative sinusoïdale par l'emploi d'un montage en pont avec R, L ou C variable, ou par la rotation d'un synchroniseur.

Les valeurs des éléments, dans la figure 19 A, conviennent pour un secteur à 50 Hz.

Quelle que soit la méthode employée, l'adaptation d'impédance du circuit de grille doit être étudiée complètement. Un grand nombre de paires de valeurs pratiques de R et C permettent d'obtenir le déphasage requis.

Dans le montage de la figure 19 A, par exemple, l'impédance du réseau déphaseur, grâce au choix des valeurs, est faible par comparaison avec la résistance du circuit de grille. Ce genre de précaution évite que le signal de commande soit distordu et déphasé, par suite du réglage de grille provoqué par la charge.

La valeur limite de la résistance de grille utilisable est fixée à celle qui diminue suffisamment la chute de tension obtenue, lorsqu'elle peut être parcourue par le courant de grille critique maximum ou par le courant de fuite (fig. 19 B).



### Commande mixte n° 1.

L'énergie est appliquée au transformateur de grille par impulsions de continu durant l'alternance négative. L'angle d'amorçage est alors presque indépendant de la forme d'onde de la tension du secteur (fig. 20 A). Les signaux continus ou alternatifs, peuvent être appliqués à la grille d'un tube à vide afin de pouvoir commander l'amplitude de la tension de pointe négative, ce qui règle également l'angle d'amorçage de grille (fig. 20 B). Cette technique est couramment utilisée. Les cathodes des thyratrons et du tube à vide ne doivent pas être communes.

La tension continue de polarisation peut être fournie, à ce montage comme aux autres, par des diodes au germanium, des redresseurs avec tubes à gaz, ou des redresseurs au sélénium. On peut obtenir différentes polarisations continues ou « polarisations alternatives » à partir d'un enroulement de transformateur pour une grille, comme le montre la figure 20 A.

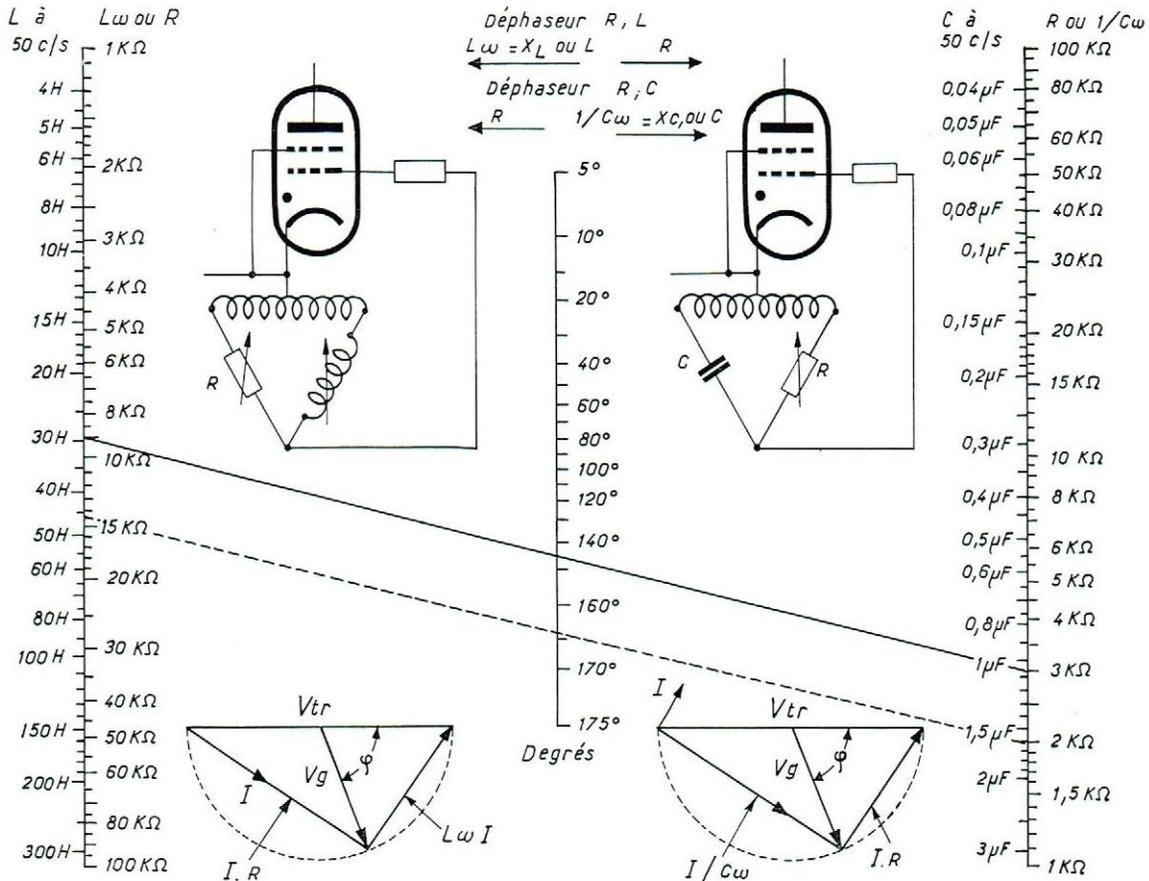


Fig. 21

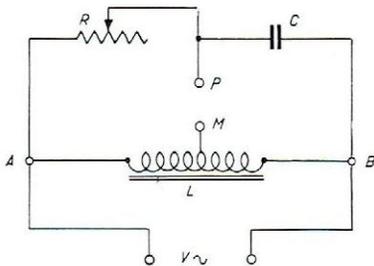


Fig. 22 A

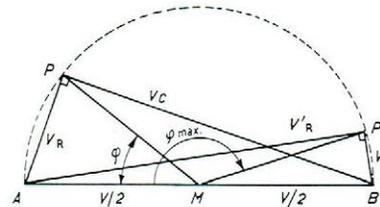


Fig. 22 B

Dans les montages de commande par la phase représentés dans l'abaque de la figure 21, la tension de grille  $v_g$  est toujours la moitié de la tension du transformateur mais déphasée sur elle d'un angle  $\varphi$ .

Faisant varier  $R$  ou ( $C$  ou  $L$ ), ou les deux éléments du circuit, on peut faire varier  $\varphi$  de  $0$  à  $180^\circ$ .

L'abaque permet de lire l'angle de retard  $\varphi$  qui correspond à un jeu de deux éléments,  $R$  avec  $L$  ou  $C$  avec  $R$ , etc.

Le trait plein (règle transparente) qui joint la réactance inductive  $X_L (= L \omega)$  et  $R$ , ou bien  $R$  et la réactance capacitive  $X_C = 1/C \omega$  coupe l'échelle

médiane DEGRÉS sur la valeur de l'angle  $\varphi$  de retard. Les deux autres échelles indiquent des valeurs, de  $L$  et  $C$ , correspondant à  $X_L$  et  $X_C$  pour  $50$  Hz.

Exemple :

$L \omega = 9 \text{ k}\Omega$  ( $28,2 \text{ H}$  à  $50 \text{ Hz}$ ),  $R = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $\varphi = 143^\circ$   
 $1/C \omega = 2 \text{ k}\Omega$  ( $1,6 \mu\text{F}$  à  $50 \text{ Hz}$ ),  $R = 11 \text{ k}\Omega$ ,  $\varphi = 160^\circ$ .

La figure 22 A indique le principe du montage du pont déphaseur. La figure 22 B montre la différence de phase entre la tension alternative constante  $PM$  et la tension d'alimentation alternative  $v$  pour deux valeurs différentes de la résistance  $R$ .

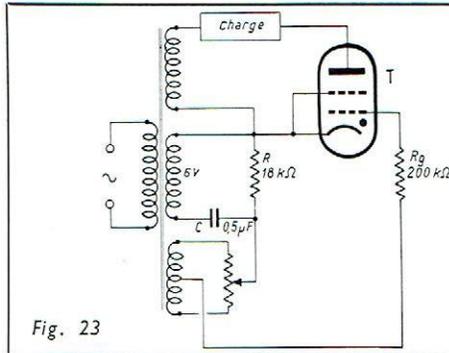


Fig. 23

### Commande mixte n° 2.

Une tension alternative d'amplitude et de sens de phase variables est superposée à une petite « polarisation » alternative, d'amplitude fixe (fig. 23). La « polarisation » alternative fixe est en général en retard de phase de 150 à 160° sur la tension d'anode.

## PRINCIPAUX CAPTEURS UTILISÉS DANS L'INDUSTRIE

### 1 - Force ou poids.

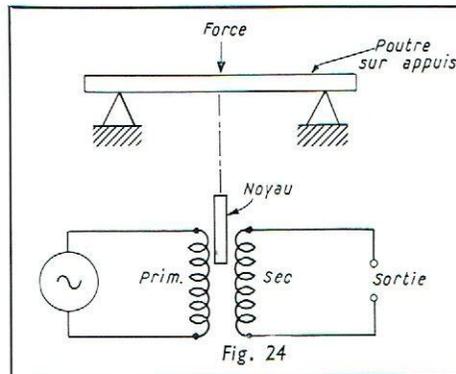


Fig. 24

### TRANSFORMATEUR DIFFÉRENTIEL

La force est appliquée à un dispositif étalonné, du type poutre élastique ou membrane. Son fléchissement commande le déplacement d'un noyau FERROXCUBE. La tension de sortie du transformateur est proportionnelle à la charge. On peut compenser les lectures nominales, et n'utiliser que les différences comme signal d'erreur.

Sortie : tension alternative de 0 à 2  $V_{eff}$ .

Domaine : 0 à 10 000 kg.

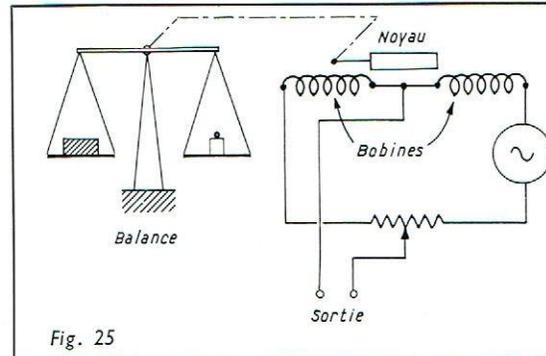


Fig. 25

### SIGNAL PROPORTIONNEL A L'ANGLE D'ÉCART

La figure 25 montre un des multiples exemples. Le fléau de la balance déplace le noyau Ferroxcube entre les bobines. Tension de sortie mesurant le déséquilibre des masses du système.

Sortie : tension alternative de 0 à 0,25  $V_{eff}$ .

Domaine : dépend des conditions d'équilibre.

Limites du déplacement linéaire : 0 à 7 cm.

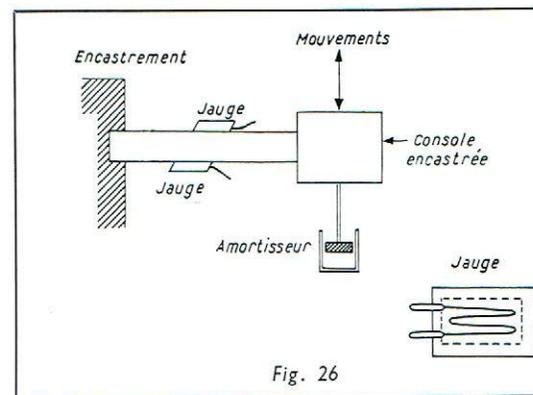


Fig. 26

### JAUGE RÉSISTANTE (STRAIN GAGE)

Les jauges résistances fixées sur des solides (par exemple un plateau de presse) traduisent la contrainte externe ou allongement de longueur sous charge.

La variation de  $R$  est proportionnelle à la charge appliquée.

Sortie : signal alternatif de 0 à 15  $mV_{eff}$ .

Domaine : de 0 à 30 000 kg.

Le même procédé contrôle les dimensions des pièces ou surfaces fermées et leurs déformations sous charge.

## 2 - Densité.

### TRANSFORMATEUR DIFFÉRENTIEL

On utilise le dispositif de la figure 24 ou celui de la figure 25.

L'organe qui commande le déplacement du noyau est un hydromètre ou pèse-liquide.

Dans le cas du dispositif non différentiel (fig. 24) la tension de sortie est un signal alternatif de 0 à 0,1  $V_{eff}$ .

## 3 - Déplacement.

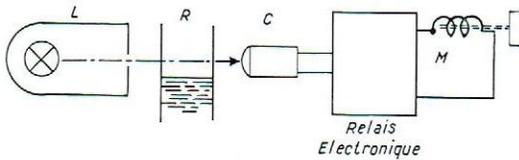
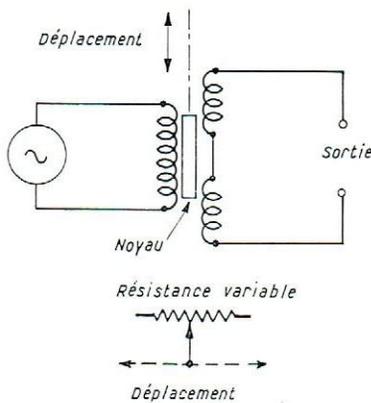


Fig. 27



### NIVEAU D'UN LIQUIDE OU DÉPLACEMENT D'UN SOLIDE

#### a) Par cellule photoélectrique :

La lumière de L est interrompue par le déplacement en R et la cellule photoélectrique, C, avec ou sans filtre de couleur, commande le relais électronique.

Domaine : infrarouge, ultraviolet, visible.

Sortie : voir la documentation « Cellules photoélectriques ».

#### b) Par variation de capacité :

La capacité d'un condensateur dont les électrodes sont fixes dépend du coefficient d'induction <sup>(1)</sup> du diélectrique et de la quantité de liquide.

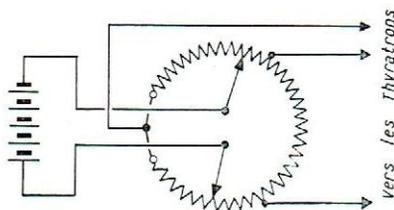


Fig. 28

### DÉPLACEMENT ROTATIF

Potentiomètre avec ou sans butée, potentiomètre magnétique, générateur du type « synchro », variations de capacités modifiant fréquence, impédance ou phase d'un circuit.

La figure 29 montre le procédé utilisant deux bobines, en pont, avec position du noyau dépendant du déplacement.

Sortie : tension alternative de 0 à 0,3  $V_{eff}$ .

Déplacement maximum de 0 à  $\pm 3$  cm.

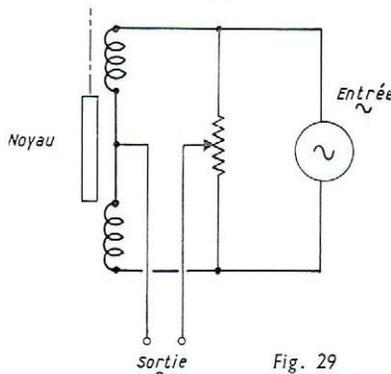


Fig. 29

### DÉPLACEMENT LINÉAIRE

Rhéostat ohmique. — Transformateur différentiel ou bobine à noyau-plongeur Ferroxcube.

La tension de sortie est fonction du déplacement et de la tension appliquée.

(1) C'est-à-dire la « constante diélectrique ».

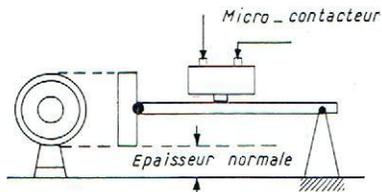


Fig. 30

### DIFFÉRENCES D'ÉPAISSEURS PAR POUSSOIR MICRO-CONTACTEUR ÉLECTRIQUE

La différence d'épaisseur au raccord des pièces d'étoffes actionne un contact qui ferme le circuit d'entrée d'un relais électronique à thyatron. L'opérateur est prévenu par avertisseur sonore. On emploie aussi, pour le contrôle continu, un capteur formant capacité, variable avec l'épaisseur.

## 4 - Vitesse.

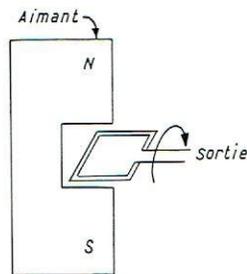


Fig. 31

### DYNAMO OU ALTERNATEUR TACHYMÈTRE

L'induit tourne dans le champ d'un aimant FERROXDURE-Tension de sortie proportionnelle à la vitesse.

Sortie : avec collecteur : de 0 à 320 CC.

avec bagues : de 0 à 160 V CA.

## 5 - Accélération.

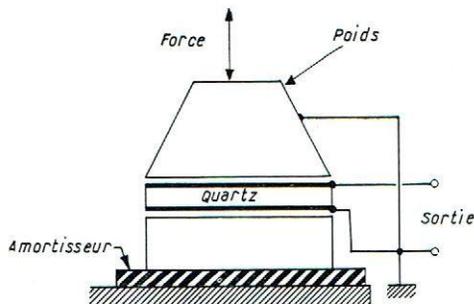


Fig. 32

### TRADUCTEUR A QUARTZ OU PHOSPHATE PIÉZOÉLECTRIQUE

Une masse  $m$  agit sur le cristal. La force d'inertie  $F$  est proportionnelle à  $m$  et à l'accélération  $\gamma$ . On pose  $\gamma = ng'$ , où  $g'$  est l'accélération de la pesanteur.

Sortie : signal de 5 à 100 mV par  $g'$ .

Domaine : entre 3 Hz et 5 000 Hz, à forme d'onde variable.

De  $n = 0,1$  à  $n = 700$ .

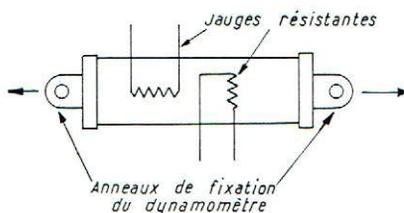


Fig. 33

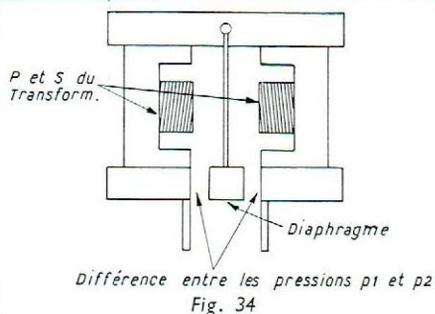
### JAUGE RÉSISTANTE (STRAIN GAGE)

Les jauges sont montées en pont. La tension de sortie est proportionnelle à l'accélération de la poutre. Les forces d'inertie, agissant transversalement sur la poutre, la font courber. Un amortisseur peut éliminer la résonance propre ou les partiels.

Signal : de 0,1 à 10 mV par  $g'$ .

Domaine : de 0 à 3 000 Hz, de 0 à 200  $g'$ .

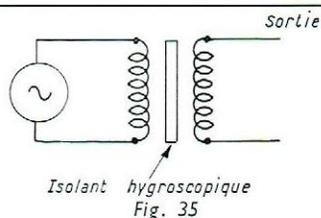
## 6 - Pression.



### TRANSFORMATEUR DIFFÉRENTIEL

Diaphragme ferreux actionné par différence des pressions :  
 Variation de couplage du transformateur.  
 Signal alternatif de 0 à 150 mV environ.  
 Domaine : 0 à 20 000 kg/m<sup>2</sup>.  
 On peut, pour des pressions plus élevées, déplacer le noyau FERROXCUBE d'un transformateur différentiel relié à l'extrémité d'un tube de Bourdon.

## 7 - Humidité.



### PAR VARIATION D'UN DIÉLECTRIQUE HYGROSCOPIQUE

La résistance de l'écran isolant entre deux bobinages varie avec l'humidité relative. L'isolant incorpore par exemple du chlorure de lithium.  
 Sortie : signal continu de 0 à 15 mV, proportionnel, par détection de la HF.  
 Domaine : humidités relatives de 3 à 96 %.

## 8 - Température.

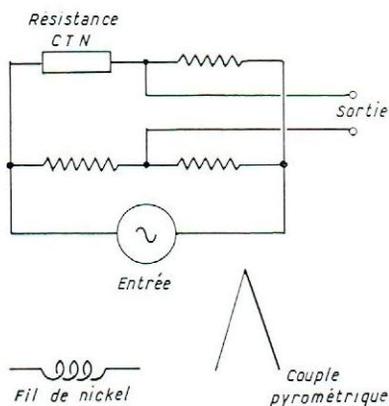


Fig. 36

a - PAR THERMOMÈTRE A CONTACTS (voir la page 00).

b - PAR RÉSISTANCE C.T.N. « TRANSCO » A GRAND COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE NÉGATIF

Ce coefficient est d'environ 10 fois plus grand (à 20 °C) que celui des métaux. La résistance diminue continuellement lorsque le courant ou la température augmente.

Domaine : résistance dans l'air — 100 °C à + 300 °C.

c - PAR RÉSISTANCE EN FIL DE NICKEL BOUDINÉ

Résistance à coefficient de température positif.  
 Domaine : couramment de 0 à 400 °C dans l'air.

d - PAR COUPLE PYROMÉTRIQUE

Deux métaux de natures différentes produisent une f.é.m. de contact proportionnelle à la différence de température des deux extrémités :

Cuivre-constantan ... de 100 à 380 °C, signal continu de 0 à 19 mV.  
 Fer-constantan ... de 0 à 820 °C, signal continu de 0 à 65 mV.  
 Chrômél-Alumel ... de 0 à 1 400 °C, signal continu de 0 à 56 mV.  
 Platine-platine rhodié de 0 à 1 600 °C, signal continu de 0 à 20 mV.

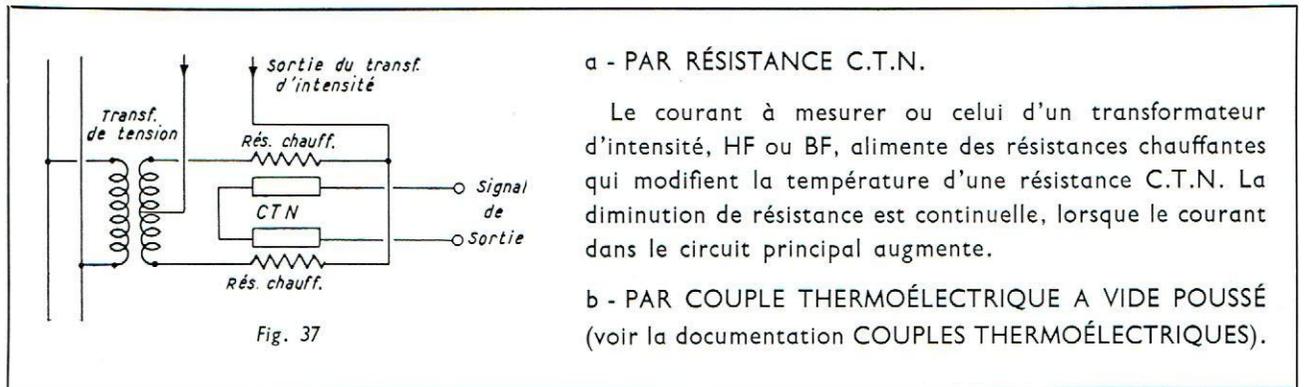
e - PAR RAYONNEMENT

Une série de couples pyrométriques reçoivent le rayonnement thermique, focalisé par une lentille.

Domaine : de 0 à 2 070 °C.

Signal : proportionnel au nombre de couples (indications ci-dessus).

## 9 - Courant.

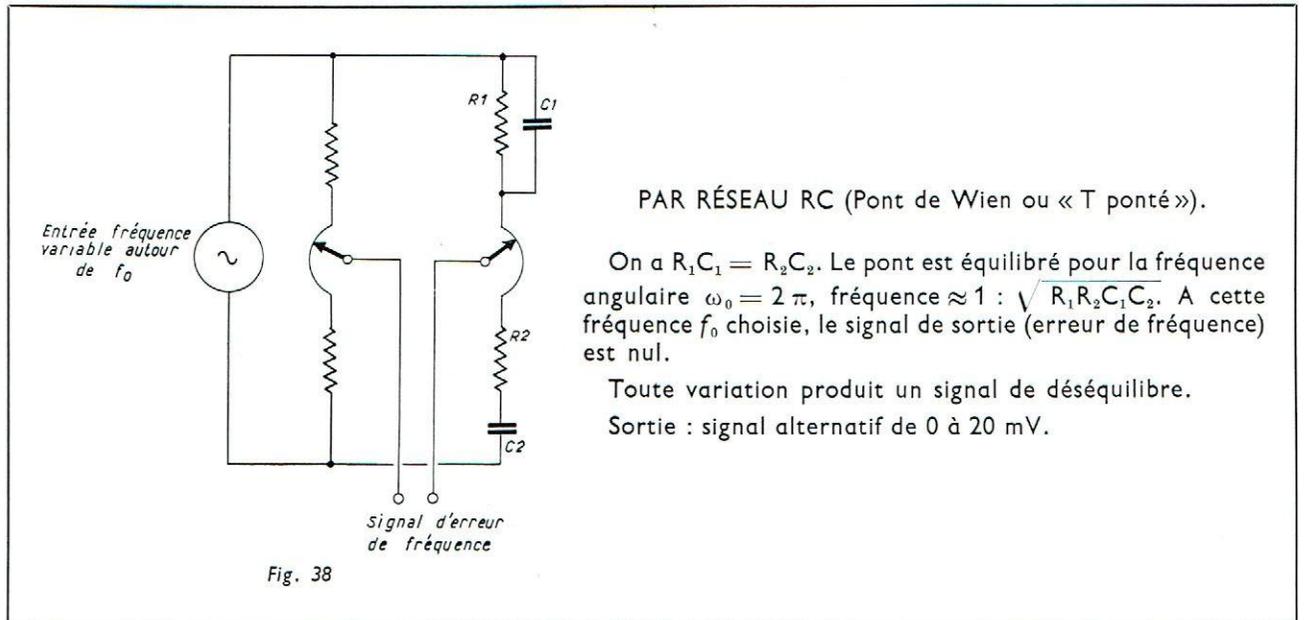


### a - PAR RÉSISTANCE C.T.N.

Le courant à mesurer ou celui d'un transformateur d'intensité, HF ou BF, alimente des résistances chauffantes qui modifient la température d'une résistance C.T.N. La diminution de résistance est continue, lorsque le courant dans le circuit principal augmente.

b - PAR COUPLE THERMOÉLECTRIQUE A VIDE POUSSÉ (voir la documentation COUPLES THERMOÉLECTRIQUES).

## 10 - Fréquence.



### PAR RÉSEAU RC (Pont de Wien ou « T ponté »).

On a  $R_1 C_1 = R_2 C_2$ . Le pont est équilibré pour la fréquence angulaire  $\omega_0 = 2\pi$ , fréquence  $\approx 1 : \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}$ . A cette fréquence  $f_0$  choisie, le signal de sortie (erreur de fréquence) est nul.

Toute variation produit un signal de déséquilibre.

Sortie : signal alternatif de 0 à 20 mV.

## 11 - Puissance.

### CONVERTISSEUR THERMIQUE

On emploie un transformateur de tension et un transformateur d'intensité pour alimenter des résistances chauffantes à une température proportionnelle à la puissance. Deux résistances C.T.N. varient en fonction de la température.

Domaine : puissance traduite dépend des rapports de transformation. (S'inspirer de la fig. 37.)

## 12 - Lumière, flammes et radiations.

### INDICATEUR DE FLAMME

En l'absence de flamme dans le foyer d'un four, une cellule photoélectrique et un relais électronique ferment les vannes du carburant.

### INDICATEUR DE FUMÉE

En cas de fumée excessive dans le four ou dans la cheminée, une cellule photoélectrique avec relais électronique déclenche un servo-moteur réglant le débit du carburant. Même dispositif pour la turbidité des liquides.

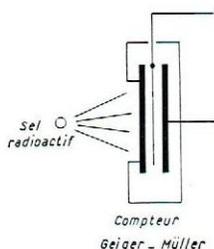


Fig. 39

COMPTEURS GEIGER MÜLLER (voir la documentation spéciale).

Un sel radioactif est utilisé comme traceur et produit des rayons  $\gamma$ .

Peut être utilisé pour mesures de déplacements ou d'épaisseurs. Le nombre d'impulsions est en raison inverse de la distance.

ÉLECTROMÈTRE (voir la documentation ÉLECTROMÉTRIE).

## 13 - Vibrations.

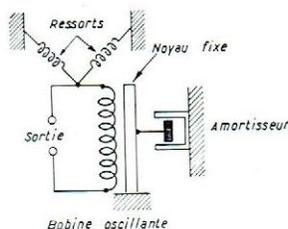


Fig. 40

### INDICATEUR MAGNÉTODYNAMIQUE DE VIBRATIONS

Une bobine montée sur des ressorts vibre, sans frottement appréciable le long d'un axe, sur un noyau fixe, convenablement amorti. La tension de sortie est proportionnelle à l'amplitude de vibration et aux fréquences.

Tension de sortie : peut atteindre 50 mV par cm/sec.

Domaines : amplitudes de 0 à 1,3 cm. Fréquences de 3 à 1 200 Hz.

## 14 - Comptages.

### NOMBRE DES OBJETS PRODUITS

Matériel : Une cellule photoélectrique avec relais électronique à thyatron et compteur mécanique à rochet.

On peut, lorsqu'il y a plus de 600 passages/mn, et si cela est nécessaire, utiliser une « échelle électronique » de 2,6 ou 12 avec compteur plus lent (1).

Les comptages rapides peuvent aussi se faire, par une voie purement électronique, à l'aide de tubes compteurs décimaux (E 1 T).

(1) Diviseur de fréquence par multivibrateurs bistables en chaînes ou en anneaux.

## UTILISATION DES THYRATRONS

### Généralités.

On doit attendre que la cathode d'un thyatron à vapeur de mercure ait atteint sa température de régime et que l'atmosphère gazeuse soit à une certaine pression, avant de lui faire fournir du courant.

Si le tube était mis en action à une température de cathode insuffisante, et à une pression de vapeur trop faible, l'ionisation serait insuffisante. La tension d'arc dépasserait largement la valeur spécifiée pour le tube et les ions présents dans l'espace anode-cathode seraient tellement accélérés que la cathode pourrait être endommagée par un bombardement excessif. C'est pourquoi il est nécessaire de brancher d'abord le filament pendant un certain temps, avant de raccorder la charge. (Temps de préchauffage)

La chaleur, engendrée pendant ce laps de temps, fait évaporer le mercure dans l'ampoule et augmente la pression gazeuse.

Cette durée d'échauffement peut être longue, spécialement pour les grands thyatrons. Pour des thyatrons PL 105, elle atteint cinq minutes. Il est nécessaire de protéger le tube. Pour cela, on dispose le montage pour avoir automatiquement, et en premier lieu, la tension appliquée au filament. S'il se produit alors une interruption accidentelle, ou voulue, de la tension d'alimentation, il y a un risque de voir les conditions de charge s'inverser après que les tubes se sont refroidis.

Une sécurité automatique peut être constituée par un contacteur à retard thermique, ou par un contacteur à minuterie, inséré dans le circuit d'anode. Mais ces dispositifs sont chargés d'interrompre un très fort courant d'anode. Ils sont donc particulièrement coûteux.

Un autre procédé, plus simple et plus avantageux, consiste à bloquer les thyatrons par leurs grilles pendant la durée d'échauffement.

### Procédés pour bloquer les grilles.

On peut maintenir les thyatrons à l'extinction si l'on applique à leurs grilles, pendant la durée d'échauffement, une polarisation négative par rapport à la cathode, assez forte pour empêcher les tubes de s'amorcer, même aux plus fortes tensions d'anode susceptibles d'être, effectivement, appliquées.

Ainsi, l'on n'utilise pas dans le circuit d'anode de contacteurs coûteux, puisque la commutation est faite dans le circuit de grille où le courant à interrompre est négligeable.

On va examiner les différentes formes de projets qui se présentent :

### 1. Thyatrons fonctionnant sur tensions continues.

C'est le cas, par exemple, pour les onduleurs. On peut les bloquer seulement au moyen d'une polarisation négative. Si les tensions de grille continues sont fournies par un redresseur, il faut obtenir que la tension de grille qui bloque les tubes atteigne la valeur requise, assez en avance sur la tension d'anode, pour que les thyatrons ne puissent pas s'amorcer. Si le redresseur de polarisation se mettait en panne, les tubes ne seraient alors plus protégés.

### 2. Thyatrons fonctionnant sur alternatif.

Les tubes peuvent être bloqués, de même, par l'application d'une polarisation continue ou, encore, au moyen d'une tension de grille alternative, en opposition de phase avec la tension d'anode. La tension de grille est ainsi négative durant toute l'alternance où la tension d'anode est positive.

Au cours de l'alternance positive de la tension de grille, l'anode est négative et il y a un courant de grille. On doit limiter ce courant, par une résistance de valeur convenable.

Trois variantes de ce dispositif de sécurité vont être indiquées :

#### a) Commande par tension de grille alternative déphasée.

Pour obtenir une tension de grille alternative avec un déphasage variable, on utilise un réseau R et C, comme celui de la figure 41.

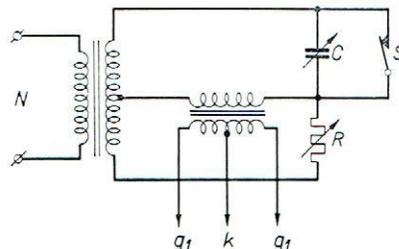


Fig. 41. — Circuit de grille d'un redresseur diphasé à deux thyatrons. Le circuit des cathodes communes est relié à k, les grilles de commande à g<sub>1</sub>. Pendant la durée d'échauffement, le contacteur S est fermé.

On ferme le contacteur S, le condensateur C se trouve court-circuité et une tension de grille alternative en opposition de phase avec la tension d'anode est alors obtenue. Lorsque la durée d'échauffement

utile vient à son terme, le contacteur S est ouvert et le thyatron n'est plus bloqué.

b) Tubes fonctionnant avec amorçage par pointes.

Selon ce procédé d'amorçage, deux tensions sont appliquées à la grille : une tension de blocage qui peut être, soit une tension alternative en opposition de phase avec la tension d'anode; soit une tension continue négative avec une tension de pointe positive qui vient se superposer à la tension de blocage au moment où le tube doit être amorcé.

Un montage simple, fondé sur ce principe, où  $T_1$  fournit la tension de blocage et  $T_2$  la tension de pointe, est représenté par la figure 42. Pour assurer la sécurité des tubes, au cours de la durée d'échauffement, le montage qui fournit la tension de pointe est temporairement débranché par ouverture des contacts S. A la fin de la durée d'échauffement, ces contacts se ferment.

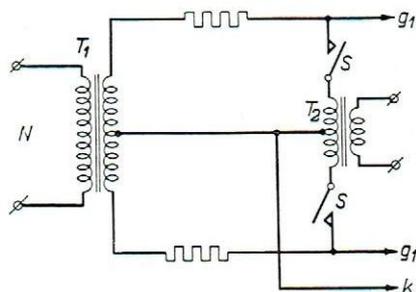


Fig. 42. — Montage semblable à celui de la fig. 1. Le transformateur  $T_1$  fournit une tension sinusoïdale et  $T_2$  une tension d'impulsion. Ces tensions superposées sont appliquées aux grilles  $g_1$  des thyratrons. Les contacteurs S sont ouverts durant le temps d'échauffement.

c) Commande par une tension continue ou par une tension de grille mixte alternative et continue.

Si l'on se sert d'une tension de grille continue variable pour commander les tubes, en régime de fonctionnement, on peut les bloquer, pendant la durée d'échauffement, si l'on superpose une tension alternative en opposition de phase avec la tension d'anode, tension alternative que l'on peut prendre directement sur le transformateur de puissance, selon la description qui suit.

**Montage pratique.**

Le procédé de maintien des thyratrons à l'extinction exposé ci-dessus est appliqué au redresseur commandé de la figure 43.

Deux tubes PL 105 sont branchés sur secteur alternatif 220 V. Aux bornes du secteur, nous trouvons une inductance à fer L, avec prise médiane. Au moyen d'un dispositif de commande adéquat TC, on peut faire

varier le point d'amorçage des tubes et régler le redresseur. Pendant toute la durée d'échauffement, les contacts  $S_5$  et  $S_6$  sont fermés. Une tension en opposition de phase est appliquée aux grilles à travers les résistances  $R_1$  et  $R_2$ . Ensuite,  $S_7$  s'ouvre, coupant le dispositif de commande TC. En fonctionnement normal, les contacts  $S_5$  et  $S_6$  sont ouverts,  $S_7$  est fermé.

Lorsqu'on applique la tension d'anode, une onde transitoire de tension peut se produire à l'anode. Sa forme dépend des constantes du circuit d'anode et de l'instant où l'on établit le contact. Cette tension transitoire pourrait être transmise à la grille du tube à travers le diviseur de tension formé par la capacité anode-grille  $C_{ag}$  et par la capacité grille cathode  $C_{gk}$  du tube. Il en résulterait un amorçage prématuré du thyatron. En branchant des condensateurs de capacités suffisantes  $C_1$  et  $C_2$  entre grille et cathode, les transitoires à la grille peuvent être tellement atténués que l'amorçage intempestif ne peut pas se produire.

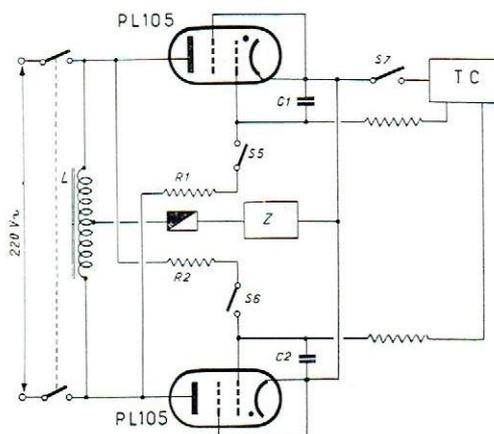


Fig. 43. — Montage de redresseur diphasé commandé avec deux thyratrons PL 105. TC est le «tableau de commande» qui règle le point d'amorçage des thyratrons.  $R_1 = R_2 = 0,1 \text{ M}\Omega$   $C_1 = C_2 = 6\,000 \text{ pF}$ . Z est la charge de sortie du redresseur.  $S_5$ ,  $S_6$  et  $S_7$  sont des contacteurs actionnés par un temporisateur.

Mais la présence de ces condensateurs peut amener quelques difficultés car ils shuntent le dispositif de commande TC. S'il en est ainsi, on peut réunir  $C_1$  et  $C_2$  aux points « actifs » de  $S_5$  et  $S_7$ , au lieu de suivre le schéma présenté.

Le fonctionnement des contacts  $S_5$ ,  $S_6$  et  $S_7$  est obtenu automatiquement au moyen du montage temporisateur de la figure 44.

Pour obtenir un délai de 5 mn entre les instants de branchement de la tension de filament et de la charge, on peut employer des relais thermiques 4152. En pratique, on en emploie deux, Rel 1 et Rel 2.

Le temps de retard de chacun de ces relais étant d'environ 2,5 mn, ce sont des relais robustes.

Lorsque l'on branche l'appareil sur l'élément chauffant du relais, Rel 1 est alimenté par le transformateur T de filament. A la fin du délai de 2,5 mn, le contact  $S_1$ , de Rel 1, va se fermer, ce qui branche l'élément chauffant du second relais Rel 2, sur le transformateur d'alimentation « filament ». Après un nouveau délai égal de 2,5 mn, le contact  $S_2$  va se fermer, ce qui actionne le relais Rel 3 qui déplace les contacts  $S_3$  à  $S_7$ .

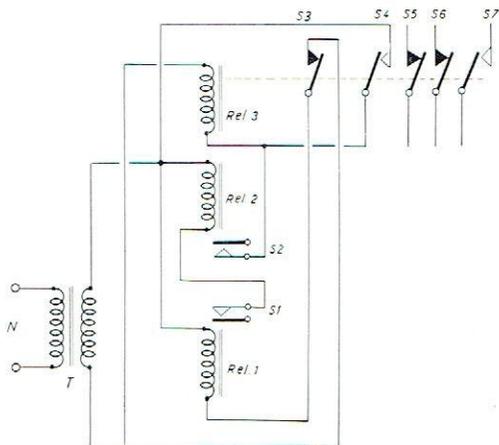


Fig. 44. — Montage du temporisateur - Rel<sub>1</sub> et Rel<sub>2</sub> sont des relais thermiques apportant chacun un retard de 2,5 mn et qui commandent les contacteurs  $S_1$  et  $S_2$ .

Rel<sub>3</sub> est un relais thermique qui commande les contacts  $S_3$ - $S_7$ , après un retard qui atteint 1 minute environ, après la coupure des contacts.

Bien que l'on puisse, en principe, employer un relais normal de téléphone pour Rel<sub>3</sub>, il est préférable d'utiliser, là encore, un relais thermique, muni des contacts de  $S_3$  à  $S_7$ . Le temps requis, pour chauffer ce relais, peut être de l'ordre d'un quart de minute, donc le retard qu'il apporte est peu important. On veut surtout introduire un retard, pouvant atteindre une minute, avant la libération des contacts, au moment où le courant de relais a été coupé.

On évite, par ce moyen, que le dispositif de retard fonctionne pendant les brèves interruptions de la tension d'alimentation. Si l'alimentation fait défaut pendant une durée moindre qu'une minute, les thyristors peuvent être rebranchés de nouveau en toute sécurité, immédiatement, sans nouvelle durée d'échauffement à prévoir, puisque la pression de vapeur est encore suffisamment grande. (On observera que si Rel<sub>3</sub> était un relais magnétique, toute interruption accidentelle de courte durée de la tension d'alimentation provoquerait, chaque fois, un manque de fonctionnement de l'appareil pendant 5 mn.)

Lorsque le relais Rel<sub>7</sub> est actionné, le contact  $S_3$  s'ouvre et le contact  $S_4$  se ferme. Les relais thermiques, Rel<sub>1</sub> et Rel<sub>2</sub>, sont ainsi débranchés et se refroidissent, mais le relais, Rel<sub>3</sub>, reste en fonctionnement, puisque le contact  $S_4$  reprend le rôle du contact  $S_2$ . Les autres contacts  $S_5$ ,  $S_6$  et  $S_7$  correspondent aux contacts marqués de façon analogue sur la figure 43. Ils sont employés pour le blocage des thyristors de la manière qui a été décrite.

Si, pour une raison quelconque, la tension d'alimentation se trouve accidentellement interrompue, le relais Rel<sub>3</sub> ne reçoit plus de courant et, à moins que l'alimentation reprenne la fourniture avant que le contact  $S_4$  soit ouvert, le montage de retard au bout de 5 mn commandera le relais Rel<sub>3</sub> à nouveau, débloquent ainsi les thyristors. On pourrait suggérer la suppression du relais Rel<sub>3</sub> et l'adjonction à Rel<sub>2</sub> des contacts correspondants. Mais il faut alors réunir, pour ce relais, des exigences incompatibles puisqu'il devrait chauffer, en 2,5 mn et se refroidir, en moins d'une minute.

### Transformateur d'impulsions.

L'amorçage des thyristors peut souvent être obtenu, avantageusement, par l'emploi de pointes d'impulsions (fig. 46) superposées à la polarisation négative de grille. On peut régler leur déphasage, relativement au secteur alternatif (fig. 45).

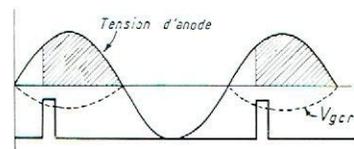


Fig. 45. — Commande de thyristors, par impulsions.

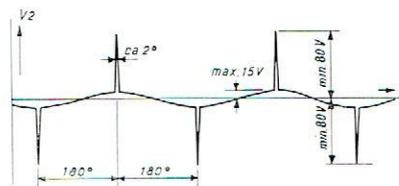


Fig. 46. — Tension de sortie  $V_2$  du transformateur producteur d'impulsions, pour une tension efficace sinusoïdale de 110 V appliquée au primaire.

Le montage déphaseur comprend en général une résistance et un condensateur et la tension obtenue à la sortie du déphaseur est appliquée au primaire du transformateur d'impulsions (Type 84 590) fonctionnant par saturation d'une partie du noyau.

Les enroulements et le noyau mixte sont contenus dans un boîtier fermé hermétiquement, avec sorties étanches, sur des passages en verre pressé.

La figure 47 indique les dimensions en millimètres du transformateur.

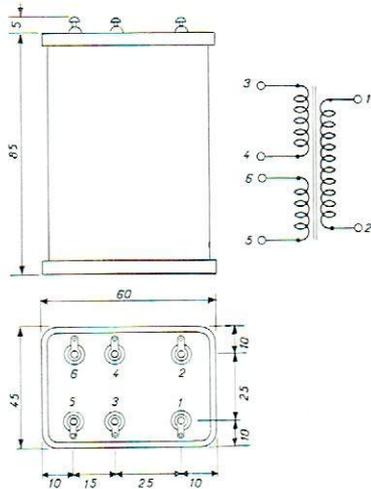


Fig. 47. — Transformateur, producteur d'impulsions (84590).

Caractéristiques du transformateur 84590 :

Tension efficace au primaire = 110 V.

Courant primaire = 40 mA env.

Tension d'impulsion = 80 V env. (Oscillogramme de la figure 46.)

### Pour éviter les bruits de grille.

Les thyratrons sont commandés par la tension présente à la grille, qu'elle soit signal ou bruit.

Pour éviter les ordres erronés à la grille, on peut observer les signaux à l'aide d'un oscilloscope, muni d'un amplificateur à courant continu, d'impédance d'entrée assez élevée pour que la tension de grille ou l'angle d'amorçage ne soient pas modifiés.

1° Il faut des connexions courtes, surtout dans le circuit de grille. La résistance de grille doit être aussi près de la borne de grille que possible. Il peut être nécessaire de blinder les connexions de grille, de connecter les blindages aux cathodes respectives plutôt qu'à la terre.

2° Pour réduire les tensions de grille transitoires, dues aux capacités internes, on peut brancher un condensateur de quelques nanofarads entre grille et cathode.

3° Des tensions transitoires peuvent se produire, dans le circuit de grille, par décharge ou charge de la capacité parasite entre enroulements d'un transformateur de grille.

On peut éviter cette difficulté par l'emploi d'écrans autour de chaque enroulement de grille du transformateur. On peut aussi employer un transformateur de grille à faible impédance ou brancher un condensateur de 3 000 à 5 000 pF en parallèle sur le bobinage.

### Précautions contre les impulsions de tension.

a) Par condensateurs.

Si l'on ouvre ou si l'on ferme un circuit, il se produit, avant l'établissement d'un régime défini du courant et de la tension, un régime transitoire. Sans précaution particulière, la transition entre l'état instantané et l'état final peut produire des variations pouvant même modifier ou empêcher le fonctionnement normal d'un montage à thyratrons, spécialement lorsque le tube travaille en interrupteur « marche-arrêt ».

Pour protéger les transformateurs contre les ondes à front raide, une bonne précaution consiste à employer un isolement renforcé pour les spires extrêmes des enroulements secondaires. La protection efficace pouvant devenir très encombrante, dès les puissances moyennes, il n'est pas toujours possible d'y recourir et les dispositions de montages qui réduisent les niveaux d'impulsions doivent donc être connues. Elles apportent l'amortissement demandé par divers moyens.

On va soumettre quelques exemples, qui peuvent être transposés pour la solution de chaque cas particulier :

La figure 48 représente deux branches ( $m$  et  $l$ ) d'un redresseur  $m$ -phasé. Ce sont deux branches successives. Au moment où le courant dans  $m$  s'annule, il ne peut s'inverser. Le thyatron  $m$  s'éteint mais le courant  $i_m$  ajouté aux bornes de  $C_m$  croît très rapidement et le thyatron s'amorce de nouveau. Cette seconde impulsion de courant est courte, et tend rapidement à s'annuler. Pendant cette durée, les thyratrons  $m$  et  $l$  agissent en même temps.

Si les  $C_1 \dots C_m$  sont d'assez grande capacité, les impulsions de tension sont beaucoup plus réduites qu'en l'absence de condensateur. La valeur de ces capacités est toutefois limitée.

Les oscillations se produisent dans chacun des circuits  $L_a$  et  $C_m$ .

Leur amplitude est, sensiblement :

$$(1 : R) \cdot \sqrt{L_a / C_m} V_0$$

dont la valeur maximale peut être simplifiée en  $kV_0$ .

La limite inférieure pour  $C_m$  est donc définie par :

$$C_m \geq L_a / k^2 R^2$$

où  $k \approx (1 / R) \cdot \sqrt{L_a / C_m}$  peut valoir, par exemple, 0,2.

Une limite supérieure est fixée, parce qu'il est toujours désirable de réduire les courants à la fréquence du réseau dans les condensateurs  $C_m$  ( $m = 1, 2, 3 \dots$ ) afin qu'ils soient, par exemple, au maximum  $0,1 I_0$ . ( $I_0$  étant le courant principal (fig. 48).

$$D'où C_m \leq 0,1 / R \cdot \omega$$

b) En pratique, la protection par condensateur peut être complétée ou facilitée, par l'adjonction d'une bobine d'arrêt  $L_x$ , en série avec  $L_a$ , et d'une branche d'amortissement parallèle  $R_d C'$  ou  $R_d C''$  (fig. 49 A et B). L'énergie perdue dans  $R_d$  n'est pas

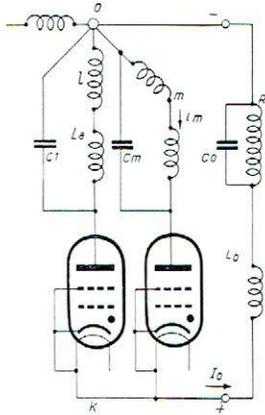


Fig. 48

très grande. Dans le montage de la figure A, on doit avoir sensiblement :

$$1 / C' \omega_0 \approx R_d$$

avec  $\omega_0 = 2 \pi \cdot f_0$  ( $f_0$  est la fréquence propre d'oscillation du circuit).

On doit aussi avoir :

$$1 / C' \omega \approx R_d$$

avec  $\omega = 2 \pi f$  ( $f$  est la fréquence du secteur).

Dans le montage de la figure 49 B, on choisit  $C''$

pour qu'à la fréquence  $f_0$ ,  $R_d$  maintienne un amortissement suffisant.

A la fréquence  $f$  du secteur,  $C_m$  et  $C''$  constituent un diviseur de tension. Il abaisse, aux bornes de  $R_d$ , la composante de tension, à la fréquence  $f$ .

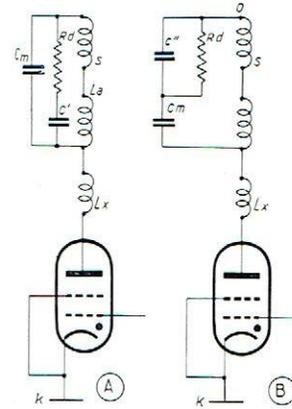


Fig. 49

Le courant dans le circuit-amortisseur comprend une composante de régime établi et un transitoire répété. La puissance qui s'y dissipe est due, principalement, aux transitoires. A chaque discontinuité de l'onde de tension, une énergie  $(1/2) C \cdot (\Delta V)^2$  est perdue dans  $R$ . Les pertes dans le circuit-amortisseur sont aussi proportionnelles au cube de la fréquence et croissent très rapidement puisque, pour une régulation donnée la perte, est proportionnelle au cube de la puissance apparente d'alimentation (VA).

## EXEMPLES DE MONTAGES

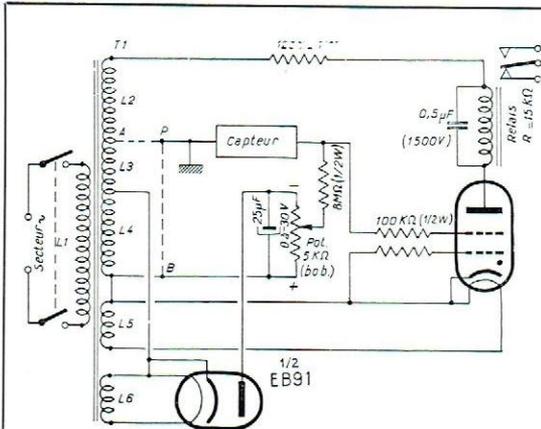


Fig. 50

### Contacteur électronique par thyatron 2 D 21.

La sensibilité est augmentée par une commande de grille-écran.

$T_1$  = Transformateur sur secteur 50 Hz.

Bobinages  $L_2 + L_3 + L_4$  pour 195 V

$L_4$  — 25 V 0,1 A

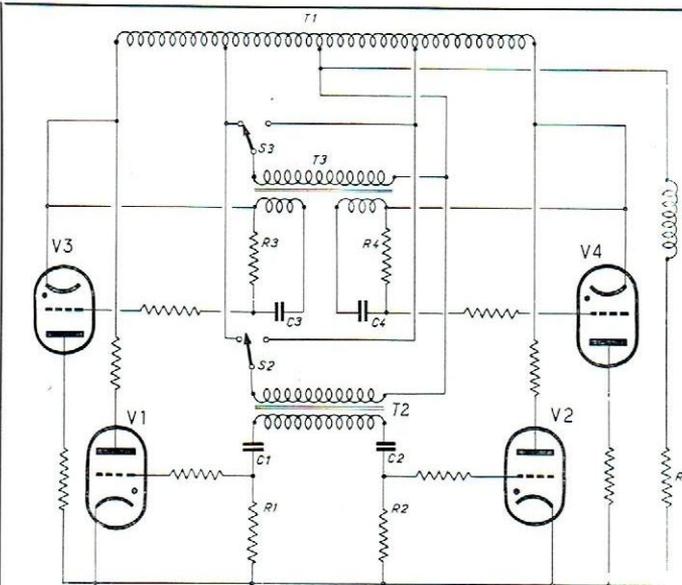
$L_5$  — 6,3 V 0,6 A

$L_6$  — 6,3 V 0,3 A

Contacteur employé pour commutation, régulation, signalisation, dispositifs d'alarme ou de sécurité, comptages, dispositifs de triage ou de pesage, selon le capteur employé. Un côté du capteur est à la terre.

La connexion, dans le cas où le capteur est une cellule photoélectrique, est PA (pointillés).

Pour l'utilisation des autres capteurs en général, la connexion PB remplace la connexion PA.



### A - Montage tête-bêche<sup>(1)</sup> à quatre tubes redresseurs (thyatrons PL 5557).

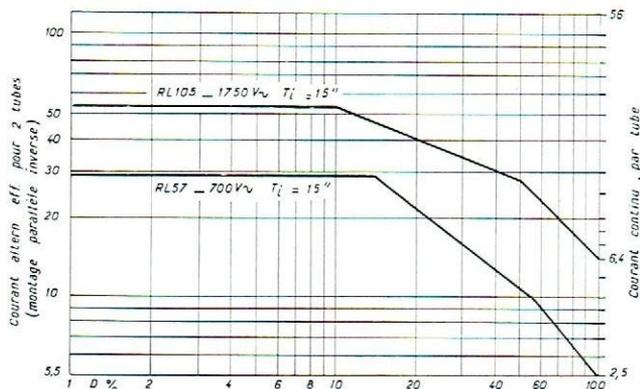
Les contacteurs permettent l'alimentation d'un moteur continu et l'inversion du sens de marche.

Tension secondaire du transformateur  $T_3 = 2 \times 30$  V.

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 22$  k $\Omega$ .

$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 0,5$   $\mu$ F.

Fig. 51 A



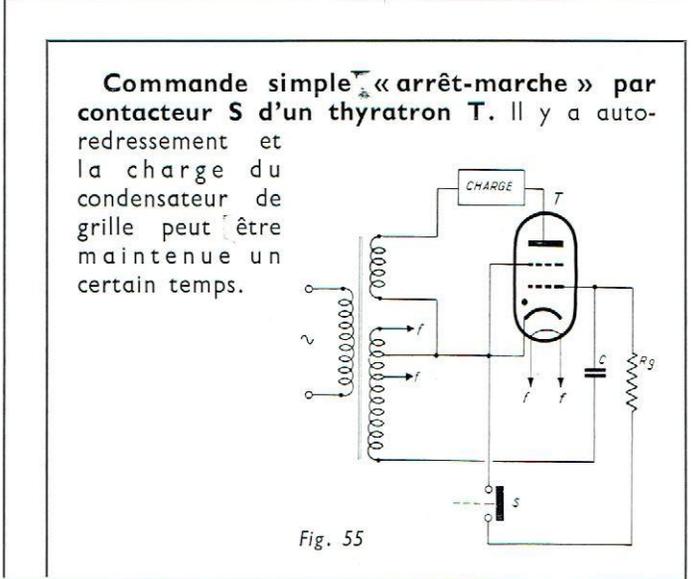
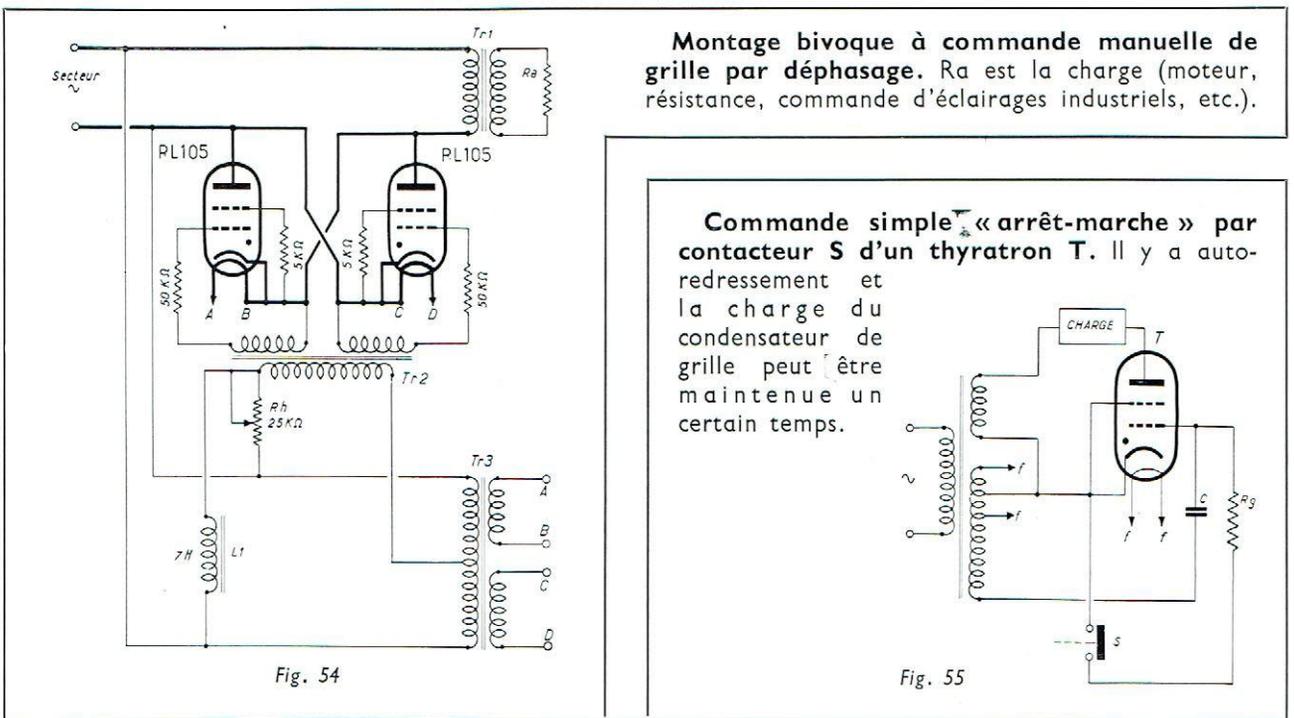
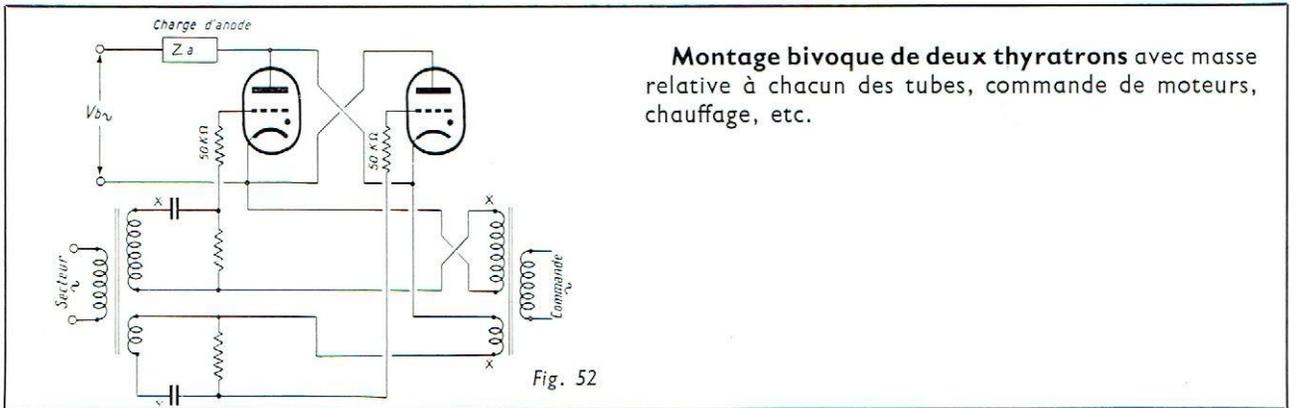
### B - Intensité efficace pour deux tubes PL 105 ou PL 5559 (ordonnées de gauche).

Temporisation du contacteur « MARCHÉ » en % de la durée D de mise en circuit (abscisses).

$D\%$  = (nombre de périodes de soudure : nombre de périodes comprises dans le temps d'intégration) 100 %.

Fig. 51 B

(1) parfois appelé « montage inverse parallèle »



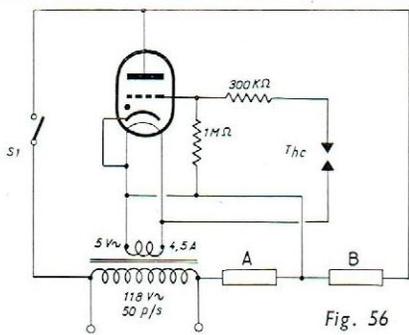


Fig. 56

**Commande «arrêt-marche» par la grille** appliquée au réglage de température par contact thermique (thermomètre ou thermostat bilame à contacts, etc. Thc). A est une résistance chauffante et B un ventilateur (impédance plus grande que l'élément A).

A l'amorçage du tube, le ventilateur court-circuité cesse de tourner et A fournit les calories utiles. S<sub>1</sub> est fermé, après le raccordement du montage au secteur, au bout d'un délai de 5 minutes environ.

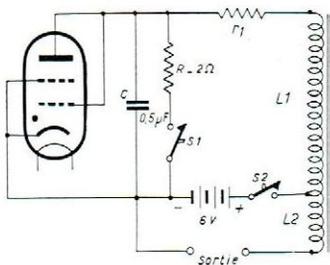


Fig. 57

### Remplacement d'un vibreur par un thyatron.

Le thyatron 2D21 permet de construire un appareil transformant le courant continu d'une batterie de 6 V en courant alternatif, pour l'alimentation de récepteurs ou d'autres appareils électroniques mobiles.

Le contacteur S<sub>2</sub> étant fermé, on presse momentanément le poussoir S<sub>1</sub>. Le courant de l'accumulateur passe à travers L<sub>1</sub> et R.

On laisse revenir le poussoir S<sub>1</sub>, une tension induite se produit sur C et sur le thyatron 2D21. Cette tension vient, en série avec celle de l'accumulateur. Lorsque les deux sont positives et de même sens à l'anode du tube, la tension devient suffisante pour amorcer le thyatron. On peut considérer que c'est alors un commutateur de résistance négligeable avec une force contre-électromotrice d'environ 8 V max. Lorsque la somme de la tension induite et de la tension de l'accumulateur devient inférieure à 12 V, le thyatron s'éteint, ce qui ouvre le circuit. Alors le champ de L<sub>1</sub> s'annule, la tension induite réamorçage le thyatron et tout se répète, jusqu'à l'ouverture de S<sub>2</sub>. Au secondaire (L<sub>2</sub>) la tension de sortie peut être redressée, et filtrée, de la manière usuelle.

La résistance r<sub>1</sub> représente la résistance intérieure du bobinage à fer, nécessaire pour la limitation du courant.

La résistance r<sub>1</sub> représente la résistance intérieure du bobinage à fer, nécessaire pour la limitation du courant.

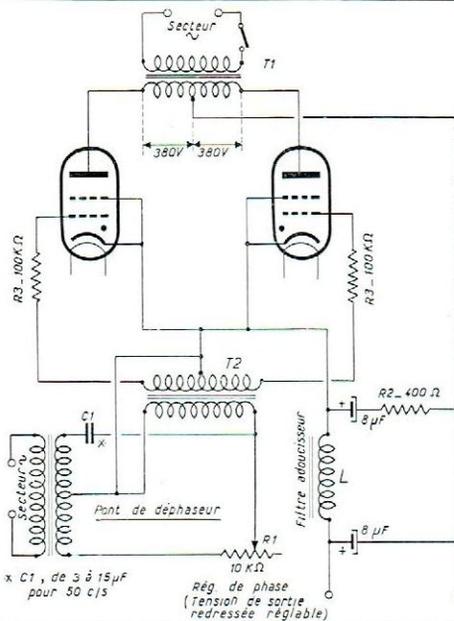


Fig. 58

### Redresseur monophasé, double alternance, par thyatrons avec commande de phase.

La phase de la tension alternative des grilles est réglée par R<sub>1</sub> et C<sub>1</sub> (voir aussi la figure 22).

Ce montage, avec des valeurs d'éléments modifiées, peut être employé avec les thyatrons triodes et tétrodes pour de plus grandes puissances d'alimentation.

R<sub>2</sub> = résistance limitant la pointe de courant pour C<sub>2</sub> : environ 1 Ω par volt efficace sur l'un des secondaires HT.

R<sub>3</sub> limite le courant de grille afin d'obtenir une polarisation correcte.

x C<sub>1</sub>, de 3 à 15 μF pour 50 c/s  
Rég. de phase (tension de sortie redressée réglable)

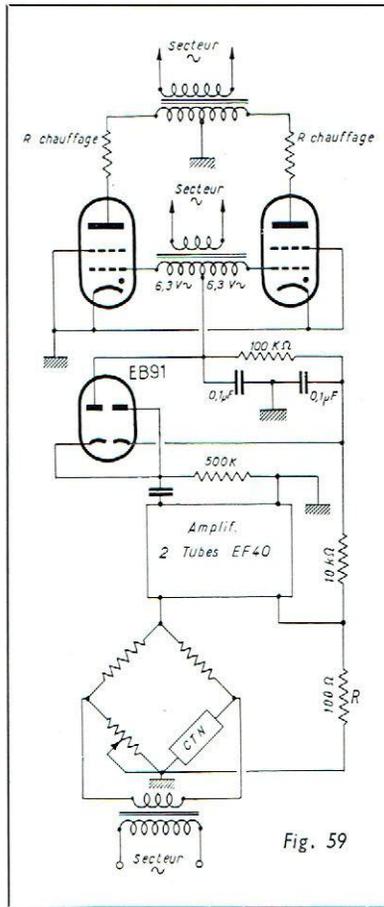


Fig. 59

### Réglage continu de température par thyratrons.

La charge des thyratrons est constituée, pour chacun, par une résistance de chauffage.

L'amorçage est commandé par la superposition d'une tension redressée et d'une tension alternative.

Des thyratrons plus puissants peuvent être commandés par ce procédé.

Les variations de température déséquilibrent le pont comprenant une résistance CTN.

### Commande en montage-série d'ignitrons par thyratrons.

Commande des soudeuses, chauffage, etc.

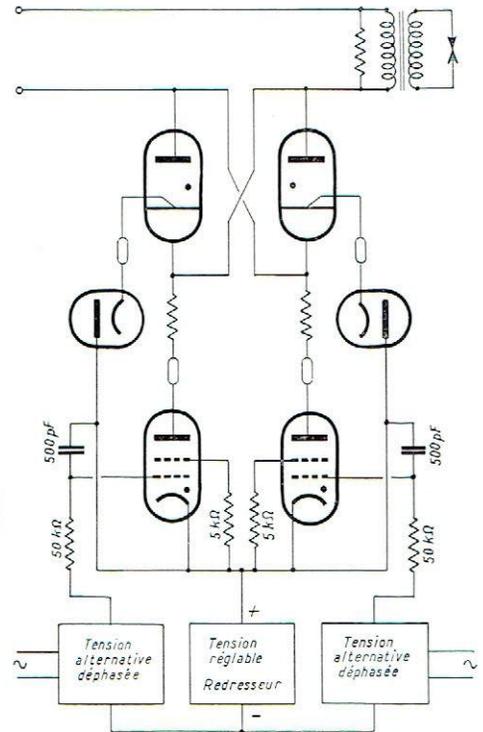
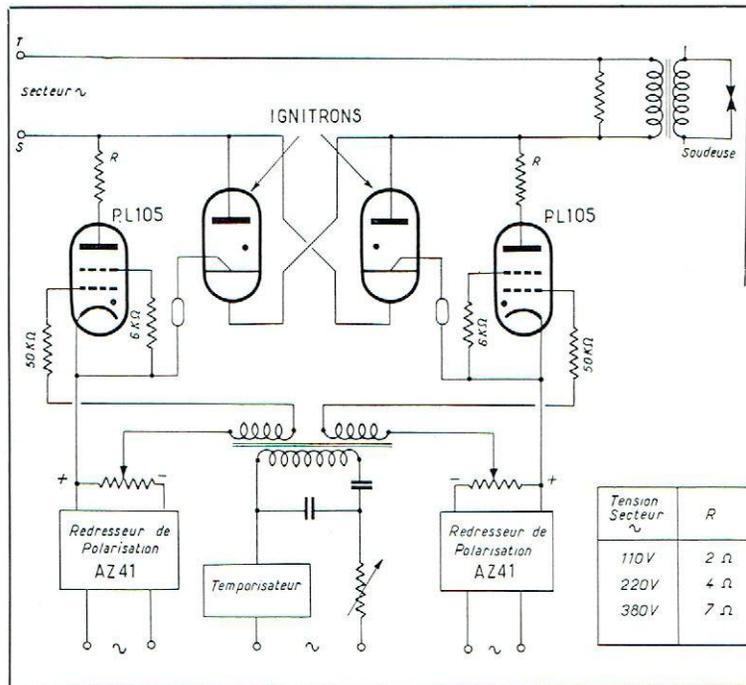


Fig. 61



### Commande parallèle d'ignitrons par thyratrons.

(Commande de soudeuses.)

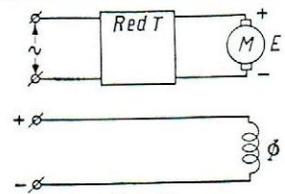
Le temporisateur est suivi d'une commande par la phase pour les thyratrons. Les tensions de grille-écran continues sont réglées séparément, pour la symétrie des conditions d'amorçage.

Tension Secteur ~	R
110V	2 Ω
220V	4 Ω
380V	7 Ω

Fig. 60

# APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES THYRATRONS

## PRINCIPES EMPLOYÉS



**Réglage de vitesse d'un moteur à courant continu M** dont on alimente l'induit par un redresseur à thyatron Red T.

Montage analogue à celui de la figure 62, mais l'excitation également est alimentée par un redresseur à thyatron Red T.

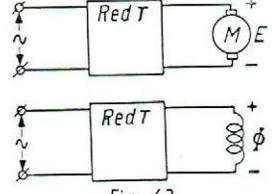
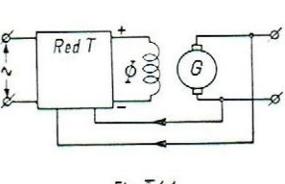


Fig. 62 Fig. 63



**Tension de sortie d'un générateur de courant continu, maintenue constante** grâce à la commande de l'excitation par un redresseur à thyatron Red T.

Montage analogue à celui de la figure 64, pour maintenir constante la tension de sortie d'un générateur G à courant alternatif.

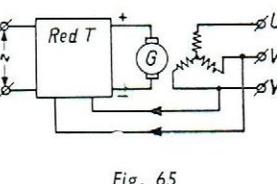
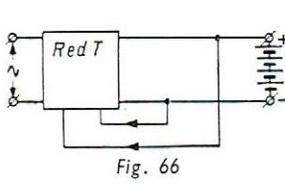


Fig. 64 Fig. 65



**Tension de sortie d'un redresseur à thyatron pour la charge de batteries, maintenue constante,** par la commande en courant continu.

Montage analogue à celui de la figure 66. La commande du thyatron est obtenue par le courant de charge des batteries, lequel est maintenu constant.

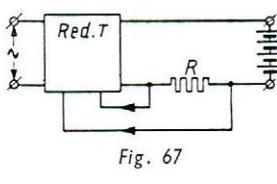
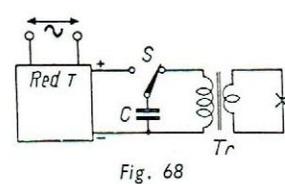


Fig. 66 Fig. 67



**Soudage par décharge de condensateurs** où la quantité d'énergie, accumulée dans les condensateurs C, est déterminée par le redresseur à thyatron Red T.

**Soudage par décharge de l'énergie emmagasinée dans l'auto-induction du primaire de transformateur Tr.** Le redresseur à thyatron, Red T, détermine l'énergie d'impulsion.

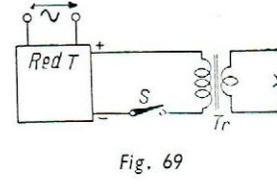
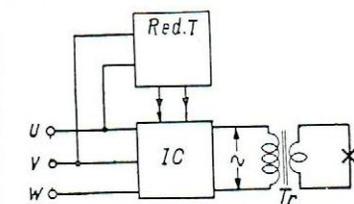


Fig. 68 Fig. 69



**Soudage par résistance.** Le transformateur de soudure Tr est alimenté par un contacteur à ignitron IC, commandé par un redresseur à thyatrons Red T.

Fig. 70

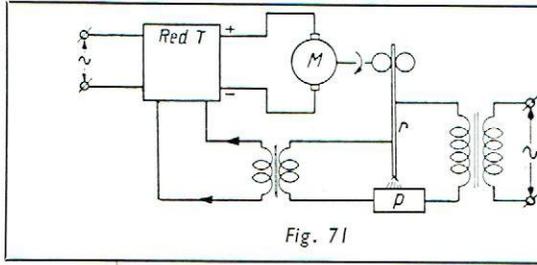


Fig. 71

**Soudeuse automatique à l'arc** où l'avance est réglée par la tension d'arc entre l'électrode r et la pièce travaillée p. Cette tension commande le redresseur à thyatron Red T. Ainsi, la vitesse du moteur, qui commande le mouvement d'électrode, maintient la tension d'arc correcte.

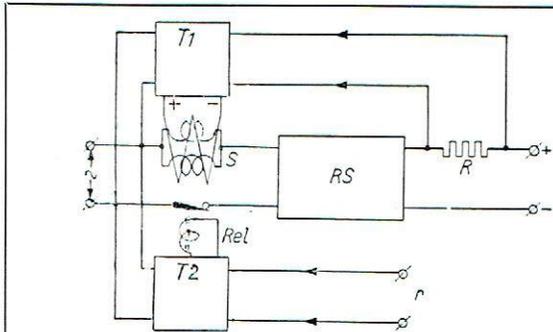


Fig. 72

**Redresseur (RS) à tension de sortie constante.** Le redresseur auxiliaire à thyatron  $T_1$  alimente l'enroulement à courant continu du transducteur S, ce qui modifie l'impédance des autres enroulements. Un relais électronique  $T_2$  à thyatron permet de couper le courant à distance. On applique une impulsion aux bornes r.

**Courant de sortie, d'un redresseur, maintenu constant.** Montage analogue à celui de la figure 72.

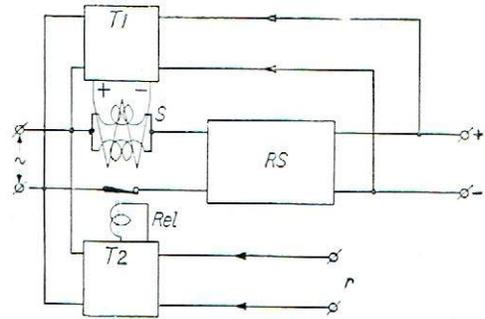


Fig. 73

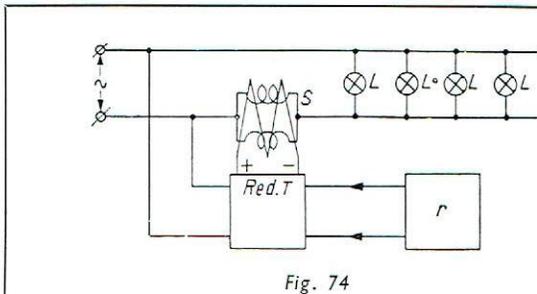


Fig. 74

**Réglage progressif de l'intensité lumineuse** d'un éclairage industriel par lampes à incandescence L. Le redresseur à thyatrons Red T, commandé à distance par le potentiomètre r qui remplace tout le « jeu d'orgues », alimente l'enroulement continu du transducteur S.

Ainsi, la variation d'impédance des enroulements à courant alternatif, branchés en série avec les lampes, règle leur intensité lumineuse.

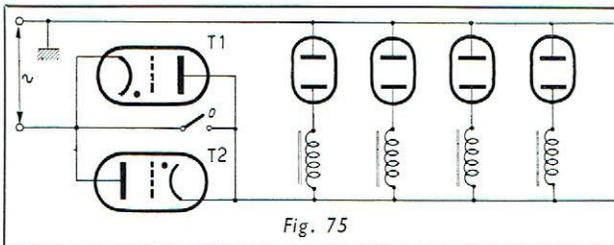


Fig. 75

**Réglage progressif de l'intensité lumineuse** d'un éclairage industriel par lampes fluorescentes ou autres lampes à décharge dans les gaz. (Montage bivoque.) Les thyatrons  $T_1$  et  $T_2$  peuvent être court-circuités par le contacteur O pour porter finalement les lampes à leur pleine intensité lumineuse.

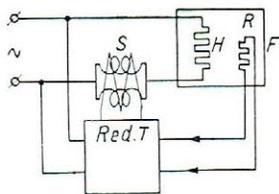


Fig. 76

**Température d'un four électrique R**, maintenue constante. La chute de tension dans les enroulements pour alternatif du transducteur S modifie l'apport de calories de l'élément chauffant H. Le redresseur à thyratrons, Red T, commande le transducteur, selon les variations du capteur F, sensible à la température.

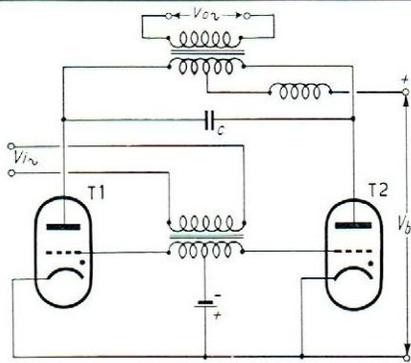


Fig. 77

**Conversion de la puissance prise en courant continu en puissance alternative, par onduleur à thyratrons.** (Pilotage extérieur.) On peut produire des tensions alternatives jusqu'à la fréquence 500 Hz, avec les thyratrons à vapeur de mercure, et jusqu'à 5 000 Hz environ, avec les thyratrons à remplissage gazeux. Un oscillateur extérieur, sinusoïdal, de tension alternative  $v_i$ , sert au pilotage de fréquence.

Le montage est la bascule de la figure 13. Le condensateur (C) y joue le même rôle, essentiel : extinction de  $T_1$  lorsque  $T_2$  est amorcé, etc. La meilleure forme d'onde s'obtient sur une sortie inductive.

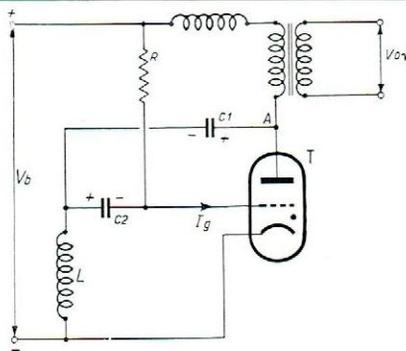


Fig. 78

**Onduleur à thyratrons à auto-pilotage (auto-nome) (1).**

Lorsque T s'amorce,  $C_1$  se décharge, et forme, avec L, un circuit oscillant, qui charge ensuite  $C_1$  aux polarités inverses de celles de la figure. La tension, au point A, tombe à la valeur d'extinction, mais le courant de grille a chargé  $C_2$ , aux polarités indiquées, et la grille est très négative par rapport à la cathode, T ne se réamorç pas.  $C_2$  se décharge alors à travers R.  $C_1$  retrouve les polarités de la figure, et T s'amorce pour un nouveau cycle de fonctionnement.

On peut, suivant ce principe, produire du courant triphasé à la sortie à partir d'une tension continue d'entrée.

Le freinage électronique des moteurs à courant continu est une autre application de l'onduleur. En marche normale, il fonctionne en redresseur à thyratrons, et alimente le moteur, à partir du courant alternatif. Au moment du freinage, il fonctionne en onduleur et il transforme l'énergie de freinage en courant alternatif qui retourne au secteur (chemins de fer, laminoirs, monte-charges, chaînes de fabrication, etc.).

(1) Parfois appelé « invertor ».

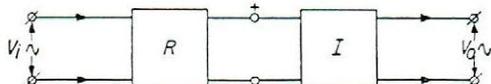


Fig. 79

**Mutateur de fréquence électronique.**

La tension alternative d'entrée  $V_i$  est transformée en courant continu, par le redresseur R, puis convertie de nouveau en alternatif, à la fréquence demandée, par l'onduleur I.

## 2<sup>e</sup> PARTIE

# SPÉCIFICATIONS ET CONSEILS POUR L'EMPLOI DES THYRATRONS

Les feuillets de spécifications des thyratrons comprennent de nombreuses données électriques, dont il est nécessaire d'expliquer en détail le mode d'utilisation.

Les conseils qui vont suivre s'appliquent en général à tous les types de thyratrons. Au cas où des précautions spéciales sont à prendre pour l'utilisation d'un tube, celles-ci sont toujours mentionnées dans les feuillets de caractéristiques.

### 1. Choix des thyratrons.

Il y a deux grandes catégories de thyratrons :

- 1° à vapeur de mercure,
- 2° à remplissage gazeux.

Le tableau ci-dessous établit quelques comparaisons d'ordre général :

	Thyratron à vapeur de mercure	Thyratron à remplissage gazeux
Équipement.....	stationnaire	stationnaire ou mobile
Gamme de température ambiante approximative.	de 15 °C à 50 °C	de - 50 °C à + 70 °C
Fréquences de fonctionnement .....	basse fréquence seulement	jusqu'à 5 kHz environ
Temps de préchauffage .....	long	court
Caractéristiques du montage .....	étude du montage simple	étude du montage plus délicate : le fonctionnement des circuits ne doit pas provoquer l'adsorption du gaz

#### 1.10. Caractéristiques de commande.

Dans la plupart des cas, la courbe de commande qui figure dans les feuillets de spécification est visiblement limitée par une courbe supérieure et une courbe inférieure. Les caractéristiques de tous les tubes doivent se trouver entre ces deux courbes à toutes les températures admissibles et pendant toute leur durée de vie. Dans les montages à plusieurs tubes fonctionnant dans les mêmes conditions, les tolérances d'ensemble seront en général mieux observées. Il convient donc de considérer les deux courbes limites publiées comme des limites extrêmes. Ce point de vue doit être pris en considération au moment où l'on calcule les circuits d'excitation de grille.

### 2. Spécifications de la tension d'anode.

Pour chaque thyatron les feuillets indiquent les spécifications de la tension maximale de crête, dans le sens direct et dans le sens inverse.

Ces spécifications sont données comme devant inclure toutes les tensions transitoires qui peuvent se produire. Il est bien évident, que si ces spécifications sont dépassées, on pourra, éventuellement, observer un amorçage non commandé des thyratrons.

Dans certaines applications il peut devenir nécessaire, d'après ces considérations, de faire fonctionner un thyatron sous une tension d'anode plus basse (1) que la tension maximale indiquée par la courbe de commande. Dans ces conditions, il faut permettre au circuit de grille d'assurer la circulation d'un courant de grille positif suffisant, afin que l'amorçage ait bien complètement lieu avec l'anode.

#### 2.10. Valeurs à ne pas dépasser.

En général ces valeurs sont établies suivant le système des limites absolues. On indique donc des maxima que l'on ne doit jamais dépasser, quelles que soient les circonstances extérieures : fluctuations de la tension du secteur, variations de l'impédance de charge, tolérances sur les pièces, surtensions, etc. Pour chaque spécification du courant moyen maximal, on indique également un temps moyen d'intégration. Cette spécification permet d'obtenir que le courant d'anode ne dépasse jamais la valeur moyenne maximale continuellement admissible, pendant une durée

(1) Nous pouvons admettre, pour fixer les idées, que cette tension est inférieure à 100 V positifs, sur l'anode du tube, au moment de l'amorçage.

## 2<sup>e</sup> PARTIE

# SPÉCIFICATIONS ET CONSEILS POUR L'EMPLOI DES THYRATRONS

Les feuillets de spécifications des thyratrons comprennent de nombreuses données électriques, dont il est nécessaire d'expliquer en détail le mode d'utilisation.

Les conseils qui vont suivre s'appliquent en général à tous les types de thyratrons. Au cas où des précautions spéciales sont à prendre pour l'utilisation d'un tube, celles-ci sont toujours mentionnées dans les feuillets de caractéristiques.

### 1. Choix des thyratrons.

Il y a deux grandes catégories de thyratrons :

- 1° à vapeur de mercure,
- 2° à remplissage gazeux.

Le tableau ci-dessous établit quelques comparaisons d'ordre général :

	Thyratron à vapeur de mercure	Thyratron à remplissage gazeux
Équipement.....	stationnaire	stationnaire ou mobile
Gamme de température ambiante approximative.	de 15 °C à 50 °C	de - 50 °C à + 70 °C
Fréquences de fonctionnement .....	basse fréquence seulement	jusqu'à 5 kHz environ
Temps de préchauffage .....	long	court
Caractéristiques du montage .....	étude du montage simple	étude du montage plus délicate : le fonctionnement des circuits ne doit pas provoquer l'adsorption du gaz

#### 1.10. Caractéristiques de commande.

Dans la plupart des cas, la courbe de commande qui figure dans les feuillets de spécification est visiblement limitée par une courbe supérieure et une courbe inférieure. Les caractéristiques de tous les tubes doivent se trouver entre ces deux courbes à toutes les températures admissibles et pendant toute leur durée de vie. Dans les montages à plusieurs tubes fonctionnant dans les mêmes conditions, les tolérances d'ensemble seront en général mieux observées. Il convient donc de considérer les deux courbes limites publiées comme des limites extrêmes. Ce point de vue doit être pris en considération au moment où l'on calcule les circuits d'excitation de grille.

### 2. Spécifications de la tension d'anode.

Pour chaque thyatron les feuillets indiquent les spécifications de la tension maximale de crête, dans le sens direct et dans le sens inverse.

Ces spécifications sont données comme devant inclure toutes les tensions transitoires qui peuvent se produire. Il est bien évident, que si ces spécifications sont dépassées, on pourra, éventuellement, observer un amorçage non commandé des thyratrons.

Dans certaines applications il peut devenir nécessaire, d'après ces considérations, de faire fonctionner un thyatron sous une tension d'anode plus basse (1) que la tension maximale indiquée par la courbe de commande. Dans ces conditions, il faut permettre au circuit de grille d'assurer la circulation d'un courant de grille positif suffisant, afin que l'amorçage ait bien complètement lieu avec l'anode.

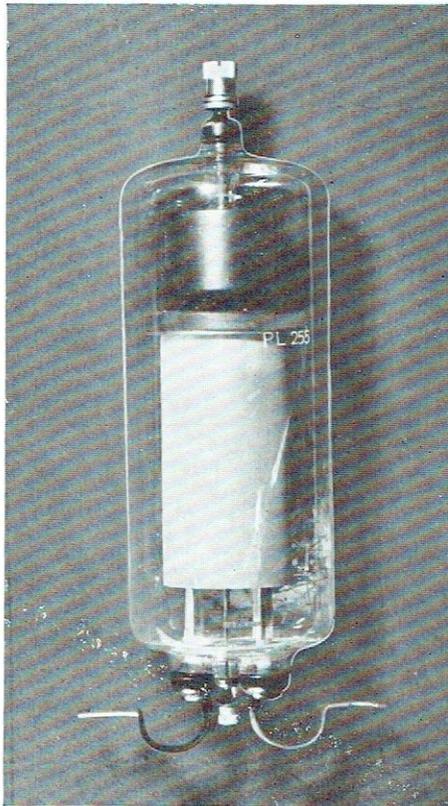
#### 2.10. Valeurs à ne pas dépasser.

En général ces valeurs sont établies suivant le système des limites absolues. On indique donc des maxima que l'on ne doit jamais dépasser, quelles que soient les circonstances extérieures : fluctuations de la tension du secteur, variations de l'impédance de charge, tolérances sur les pièces, surtensions, etc. Pour chaque spécification du courant moyen maximal, on indique également un temps moyen d'intégration. Cette spécification permet d'obtenir que le courant d'anode ne dépasse jamais la valeur moyenne maximale continuellement admissible, pendant une durée

(1) Nous pouvons admettre, pour fixer les idées, que cette tension est inférieure à 100 V positifs, sur l'anode du tube, au moment de l'amorçage.

qui pourrait donner lieu à la production d'une température excessive dans le tube. Le courant anodique maximal de crête est déterminé par l'émission de cathode, tandis que le courant moyen est limité par ses effets thermiques.

En aucun cas, le courant de crête ne doit dépasser la valeur maximale publiée. Pour déterminer la valeur réelle de la tension inverse de crête ou du courant anodique de crête, les éléments qui sont à considérer principalement sont les valeurs mesurées, que ce soit avec un oscilloscope ou par toute autre méthode.



Thyatron PL 255.

## 2.20. Caractéristiques nominales.

### 2.21. Tension d'arc.

Les valeurs indiquées pour la tension d'arc ( $V_{arc}$ ) s'appliquent aux conditions moyennes de fonctionnement. Si celles-ci font intervenir un courant de crête élevé (dans le cas d'un redresseur hexaphasé, par exemple) la tension d'arc sera plus élevée. La variation de la tension d'arc dépend du montage, mais on peut s'attendre à trouver couramment  $\pm 1$  V. Au cours de la durée de vie du tube, il faut tenir compte d'une augmentation possible de la tension d'arc de 2 V environ.

Le thyatron étant utilisé normalement dans la gamme des intensités fixées par le constructeur, la pratique confirme que la tension d'arc (ou chute de tension interne) est sensiblement indépendante de l'intensité.

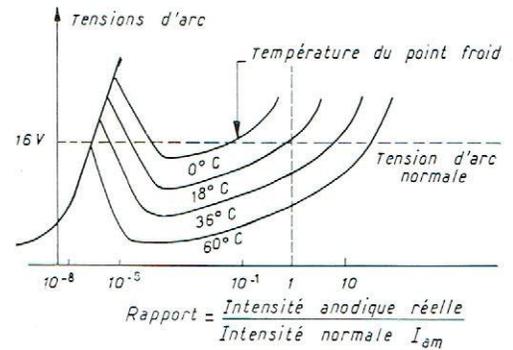


Fig. 82

Mais si l'on considère l'ensemble des valeurs d'intensité utilisables (voir l'allure des courbes de la figure 82, la tension d'arc varie un peu pour de grandes variations d'intensité. Les coordonnées employées sont : en abscisses, le rapport de l'intensité présente à l'intensité nominale et en ordonnées la tension d'arc. La ligne en traits interrompus marque la tension normale : 16 V.

Aux rapports d'intensité compris entre  $10^{-8}$  et  $10^{-5}$  (abscisses) on voit que la tension d'arc augmente car, l'ionisation étant faible, le tube à gaz travaille dans ce cas comme un tube à vide qui aurait un mauvais vide.

Pour les forts rapports (grandes intensités de courant) la chute de tension augmente et dépend de la pression du gaz dans l'ampoule.

Dans les thyatrons à vapeur de mercure la pression intérieure dépend de la température du point le plus froid de l'ampoule. A  $18^\circ\text{C}$ , il ne doit pas se

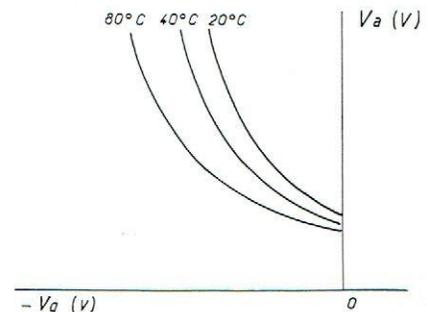


Fig. 83

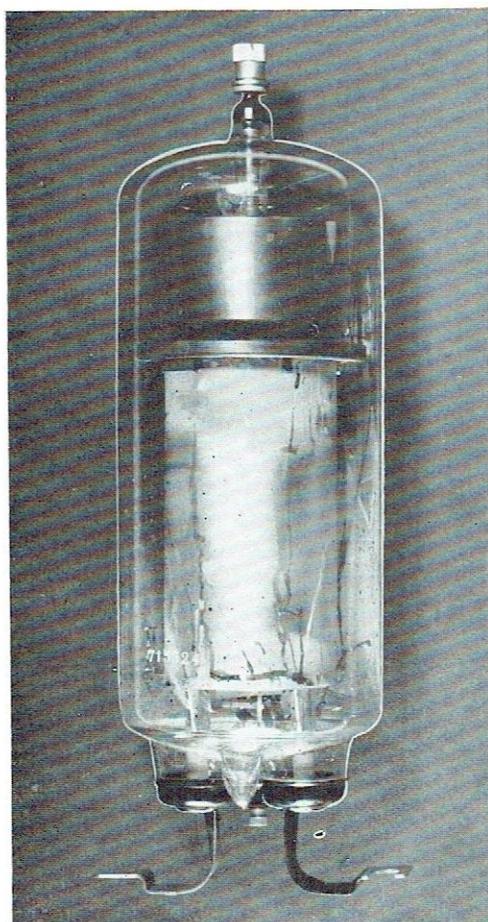
présenter de surcharge de courant momentanée. A  $0^\circ\text{C}$ , la désintégration de cathode a lieu à l'intensité normale d'emploi. C'est pourquoi on doit ménager

un délai de préchauffage suffisant, selon les indications données.

Une température trop élevée doit également être évitée. Il faut diminuer de moitié la tension inverse admise si la température du point froid passe de 36 °C à 72 °C. De même la température déplace la caractéristique de grille critique (fig. 83). Il convient donc de maintenir la température, par exemple en utilisant un jet d'air réglé dirigé vers le culot, pour les thyratrons installés dans des cabines où l'on a vérifié que la température peut dépasser les données d'emploi recommandées.

## 2.22. Fréquence.

Sauf dans le cas d'indications différentes, la fré-



Thyatron PL 260.

plus élevées peuvent être utilisées. Le constructeur voudra bien, sur ce point, nous soumettre ses problèmes particuliers.

## 3. Spécifications du courant anodique.

Il ne faut jamais dépasser les caractéristiques fixées pour le courant moyen et pour le courant de crête. On doit calculer le maximum possible du courant moyen à l'aide du temps d'intégration  $T_i$  qui figure dans le feuillet de caractéristiques du tube. La valeur obtenue par ce calcul ne doit jamais dépasser la valeur limite publiée. Pour un temps de fonctionnement  $t$  plus court, il faut satisfaire à la condition suivante :

$$i_{ap} \leq I_{am} \cdot \frac{T_i}{t}$$

Pour un fonctionnement permanent à partir d'une tension sinusoïdale, et sur charge purement résistive, on pourra se servir des données des figures 84 et 85 qui

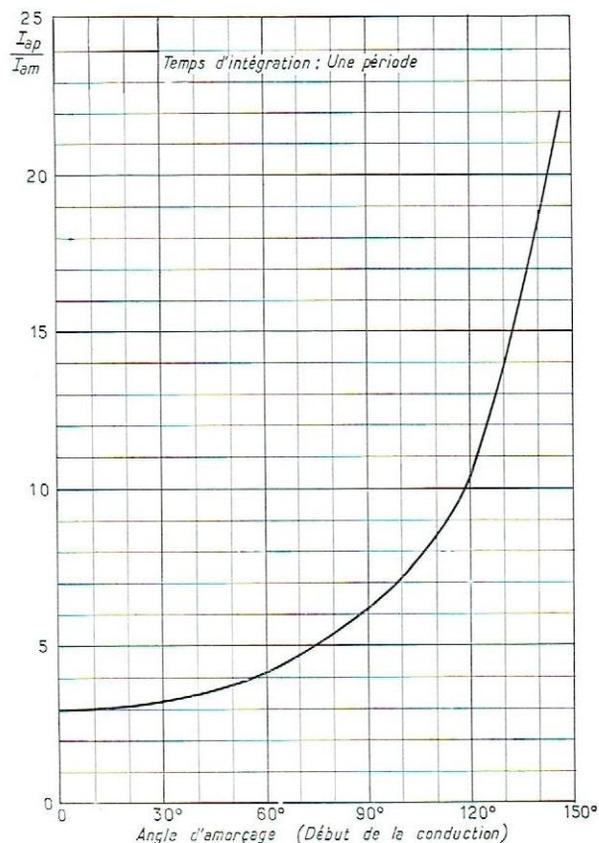


Fig. 84

quence maximale de fonctionnement des tubes, avec le courant maximal, est de 150 Hz.

Dans certaines conditions spéciales, des fréquences

permettent de lire le rapport entre le courant anodique de crête et le courant anodique moyen. La lecture de ces courbes doit, dans chaque cas, être confirmée par l'expérience, à l'aide d'une mesure.

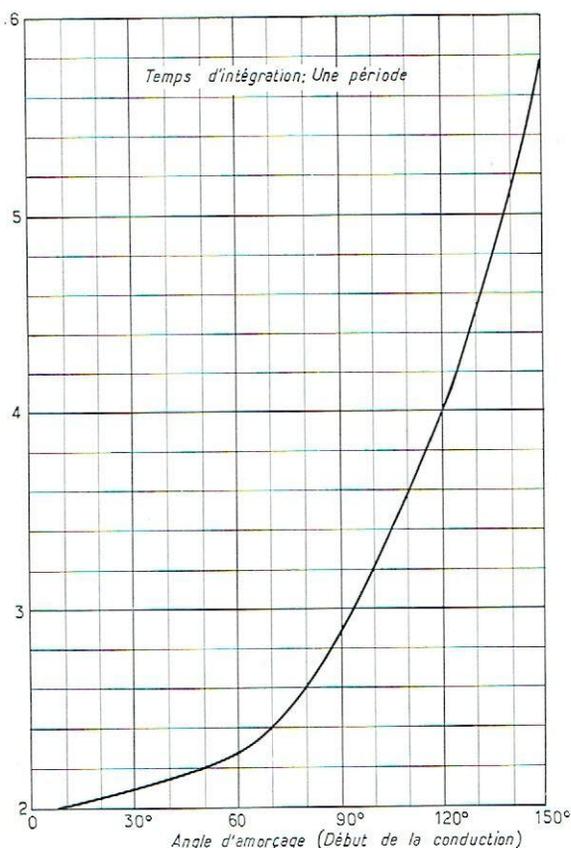


Fig. 85. — En ordonnées, on lit des rapports  $I_{ap}/I_{am}$  plus petits que ceux donnés par la figure 84.

### 3.10. Courant anodique maximal de crête.

Le courant anodique maximal de crête est, en fait, limité par l'émission maximale de la cathode et par la pression du gaz ou de la vapeur du remplissage. Toute tentative pour dépasser la valeur indiquée, tendrait à augmenter la tension d'arc du tube et réduirait sa durée de vie. Le courant anodique de crête peut être mesuré à l'aide d'un oscillographe; cette méthode de mesure étant la meilleure, il convient d'y recourir.

Pour certains thyatron, il existe une seconde limitation du courant anodique de crête, plus basse car elle correspond au fonctionnement sur des fréquences inférieures à 25 Hz. Cette limite à ne pas dépasser, est destinée à éviter la détérioration de la cathode. L'emploi de fréquences basses correspond, évidemment, à l'utilisation d'un fort courant de crête, pendant des durées *relativement trop longues*.

### 3.20. Courant cathodique moyen (valeur à ne pas dépasser).

Le courant cathodique moyen, mesurable à l'aide d'un galvanomètre à cadre, détermine la puissance dissipée par le thyatron pour fournir le courant dans

la charge. Si  $v$  et  $i$  sont les valeurs instantanées de la tension d'arc et du courant anodique d'un thyatron, la puissance moyenne dissipée sur l'anode, est :

$$P_a = (1/t) \int_0^t v \cdot i \cdot dt$$

Toutefois, comme la tension  $V_{arc}$  est sensiblement constante et, de plus, suffisamment indépendante du courant anodique, on a aussi :

$$P_a = (V_{arc}/t) \int_0^t i \cdot dt = V_{arc} \times I_{am}$$

Dans cette équation,  $I_{am}$  est le courant anodique moyen. Il est clair que si l'on fait fonctionner le thyatron au-dessus de sa spécification de courant d'anode moyen  $I_{am}$ , il se produira une dissipation de température excessive dans le tube, capable de réduire sa durée de vie.

### 3.30. Spécification du courant de court-circuit.

C'est la valeur d'un saut de courant accidentel qui peut se produire un certain nombre de fois durant la vie d'un tube, sans l'endommager d'une façon permanente. Cette spécification figure dans les feuillets de caractéristiques afin de servir de base pour l'établissement du projet, mais elle concerne plus spécialement l'étude auxiliaire des dispositifs de protection (disjoncteurs). Il est évident que cette spécification ne doit, *en aucun cas*, être prise comme une donnée d'utilisation.

## 4. Tension maximale de polarisation de la grille.

Deux valeurs de la tension maximale négative de commande de grille sont indiquées dans les nouvelles caractéristiques, l'une est relative aux conditions d'emploi qui précèdent la conduction et l'autre s'applique à la durée de conduction du courant. Le chiffre correspondant à la valeur *avant la conduction* est la tension négative maximale que l'on peut appliquer à la grille, sans provoquer d'amorçage entre cathode et grille. Le maximum spécifié pendant la durée de la conduction (à la conduction) intervient dans les applications où le signal de grille tend à maintenir la grille négative, lorsque le tube est amorcé. Un exemple de ce genre d'application est l'amorçage d'un thyatron par impulsions. Cette valeur à ne pas dépasser est destinée à éviter un bombardement excessif de la grille. (on reviendra plus loin sur ce point).

### 4.10. Courant maximal de la grille de commande.

On indique une valeur maximale admissible pour le courant de la grille de commande, plus spécialement en vue de réduire le risque d'adsorption (1) du gaz et les étincelles de surface sur la grille. De plus, lorsqu'il se produit un courant de grille positif et que

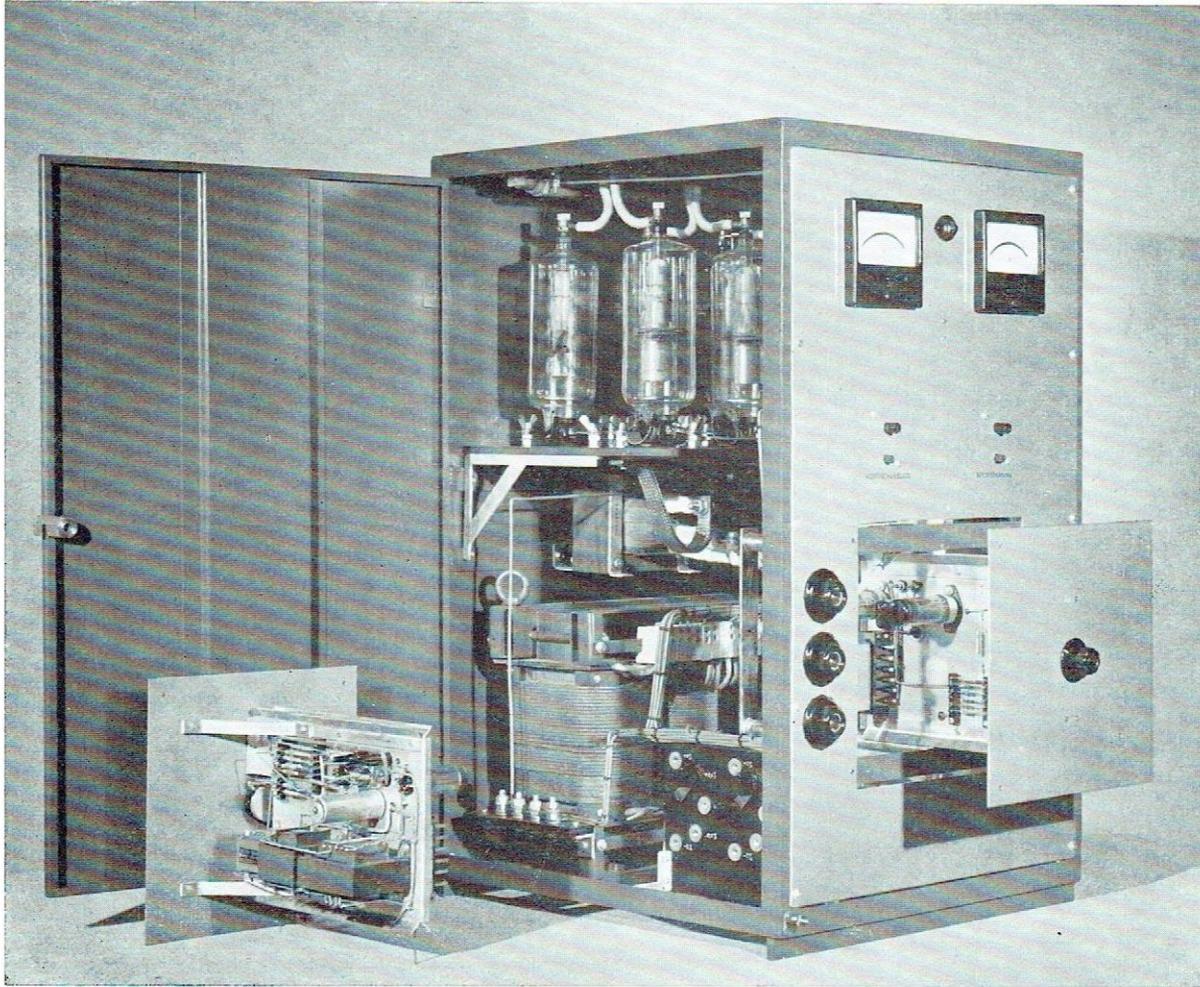


Fig. 86. — Alimentation stabilisée à thyristors PL 150, pour machines à calculer.

l'anode est plus positive que  $-10\text{ V}$ , il devient nécessaire de limiter le courant de grille, afin de maintenir la dissipation de grille dans des limites raisonnables.

#### 4.20. Résistance du circuit de la grille de commande.

Les feuillets de spécifications des thyristors indiquent souvent une valeur maximale et une valeur minimale de la résistance du circuit de la grille de commande.

#### 4.21. Valeur minimale de la résistance du circuit de la grille de commande.

La valeur minimale de la résistance du circuit de la grille de commande est déterminée, principalement, par la nécessité de maintenir le courant de grille au-dessous d'une certaine valeur. De plus, dans quelques applications, par exemple l'amorçage par impulsions, le signal appliqué à la grille de commande tendant à maintenir la grille négative pendant la

durée de la conduction, il est alors indispensable que la tension de grille réelle <sup>(2)</sup> soit toujours plus positive que  $-10\text{ V}$ . On a déjà insisté précédemment sur cette condition. La tension de grille dépend étroitement de la valeur de la résistance de grille. Dans le graphique représentant le courant ionique de grille du tube, celui-ci est figuré pour un certain nombre de valeurs différentes du courant anodique moyen. D'après l'examen de ces courbes, et par interpolation si cela est nécessaire, on peut déterminer le courant ionique qui convient pour une application particulière donnée. Il faut alors choisir la résistance de grille de telle sorte que lorsque ce courant ionique circule, la tension aux bornes de la résistance puisse compenser la tension de signal appliquée à la grille. On remarquera

(1) Pour l'explication du mot adsorption. Voir 7.20, page 38.

(2) Tension mesurée directement entre la cathode et la grille du tube, à l'aide d'un voltmètre dont l'impédance interne est de forte valeur par comparaison avec la résistance de grille utilisée.

qu'il faut donner à la résistance de grille une valeur minimale plus élevée si l'on emploie des valeurs plus faibles du courant anodique moyen. Toutefois, si la valeur instantanée du courant anodique est très faible, cette restriction sur la valeur de la résistance de grille ne s'applique plus. D'une manière générale, la grille doit toujours être plus positive que  $-10\text{ V}$ , pour toutes les valeurs du courant anodique supérieures de plus de  $10\%$  à la valeur du courant anodique moyen maximal  $I_{am}$ , spécifiée dans les feuillets.

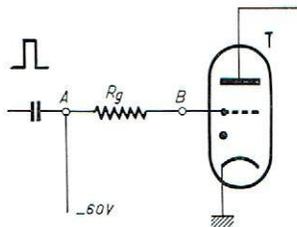
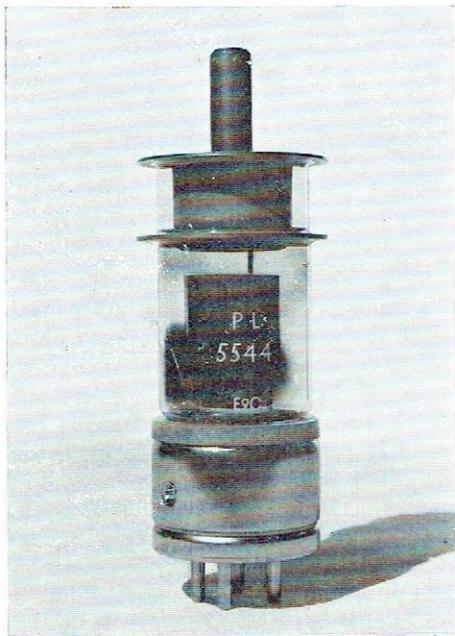


Fig. 87

Pour montrer sur un exemple l'utilisation de la courbe du courant ionique de grille, une application en sera faite au thyatron, type PL 5544, pour lequel



Thyatron PL 5544.

le courant de cathode moyen est de  $3,2\text{ A}$ . On supposera que l'application envisagée est l'amorçage par impulsions, et que durant la partie la plus grande de la durée de conduction du tube, le point A de la

figure 87 est maintenu à  $-60\text{ V}$  par rapport à la cathode. Dans ces conditions, la tension de la grille de commande (point B) doit être maintenue hors de la limite  $-10\text{ V}$ ; on peut dire qu'elle doit être maintenue, par exemple, à  $-8\text{ V}$ . D'après la courbe du courant ionique de grille du tube PL 5544 (fig. 88), on voit qu'un courant ionique de grille de  $-53\text{ mA}$  va circuler lorsque le courant anodique moyen est de  $2,4\text{ A}$  et que la tension de la grille est de  $-8\text{ V}$ . Ainsi

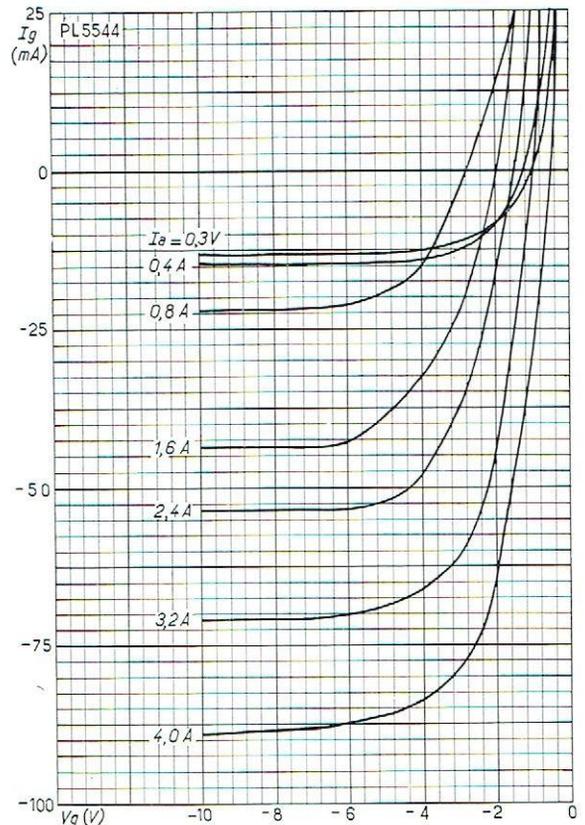


Fig. 88

un total de  $-60 - (-8) = -52\text{ V}$ , doit être obtenu sous la forme d'une chute de tension sur  $R_g$  lorsqu'il y circule un courant de  $-53\text{ mA}$ . Donc, la valeur minimale de  $R_g$  est donnée par :

$$R_{g \min} = \frac{-52}{-53 \times 10^{-3}} \approx 1\text{ k}\Omega.$$

#### 4.22. Valeur maximale de $R_{g1}$ .

On pourrait supposer qu'une très grande valeur de la résistance de grille devrait être adoptée, afin d'éviter une perte de puissance sur la source de signal de

grille, ainsi qu'une réduction des courants de conduction de grille. Mais cette idée intuitive n'est pas entièrement exacte, car il faut tenir compte des effets d'émission de la grille, du courant de fuite et, aussi, de la capacité grille-anode. Par conséquent, il existe également une limite à ne pas dépasser pour cette valeur de la résistance. Dans les thyratrons, une petite quantité de matière émissive vient assez souvent se déposer sur la grille de commande. Lorsque l'anode est positive, les électrons se déplacent entre la grille de commande et l'anode. Le courant de grille correspondant produit une chute de tension aux bornes de la résistance de grille. Cette chute de tension rend la grille plus positive qu'elle ne devrait l'être et tend aussi à amorcer les thyratrons. Cet effet particulier augmente en importance, lorsque l'on choisit des valeurs trop élevées de la résistance de grille. De la même manière, la capacité grille-anode fait circuler un courant anode-grille et exerce une action de conduction vis-à-vis de la tension alternative d'anode. Ce courant engendre également une tension, défavorable au bon fonctionnement, aux bornes de la résistance de grille. Pour réduire ce signal indésirable, le seul remède consiste à utiliser une plus faible valeur de la résistance de grille.

Les valeurs maximales de la résistance de grille indiquées pour les thyratrons ont été choisies de telle manière que ce signal indésirable soit négligeable et soit compris dans les écarts possibles de la tension critique d'amorçage. Il est à remarquer que, pour les thyratrons les plus puissants, l'on indique une résistance de grille maximum de 100 k $\Omega$ . Par contre, pour certains thyratrons de faible puissance, comme les types PL 5727 ou 2 D 21, les capacités internes et les courants d'émission de grille sont si faibles que l'on a pu conseiller l'emploi d'une résistance de grille maximale de 10 M $\Omega$ .

Lorsque l'application envisagée exige l'utilisation d'une valeur aussi élevée, il faut prendre soin de vérifier que l'embase du tube et son support sont propres et bien secs, afin de diminuer les courants de fuite entre les broches d'anode et de grille. De même, si l'on alimente un thyatron à l'anode par une tension alternative et que la résistance de grille ait une valeur très élevée, il faut maintenir la faible capacité du circuit entre la grille de commande et l'anode. Cela peut être obtenu en reliant la résistance de grille directement à la sortie de grille du support et, dans le cas d'un thyatron tétrode, en reliant la grille-écran à la cathode, directement au ras du support. Si les thyratrons doivent fonctionner à des tensions d'anode inférieures à la tension d'amorçage, une limite à la résistance maximale du circuit de grille doit être imposée, puisqu'il est alors nécessaire d'obtenir un courant de grille positif suffisant, pour faire naître l'amorçage de l'arc sans difficulté.

#### 4.30. Effet du courant ionique positif.

Lorsqu'un thyatron est amorcé, un courant ionique positif d'une amplitude proportionnelle au courant cathodique se trouve engendré. En général, ce courant va se diriger vers l'électrode qui est à la tension la plus négative pendant la conduction, par exemple vers la grille. Afin d'éviter la détérioration du tube, il est nécessaire de s'assurer que la tension de cette électrode est plus positive que  $-10$  V au cours de

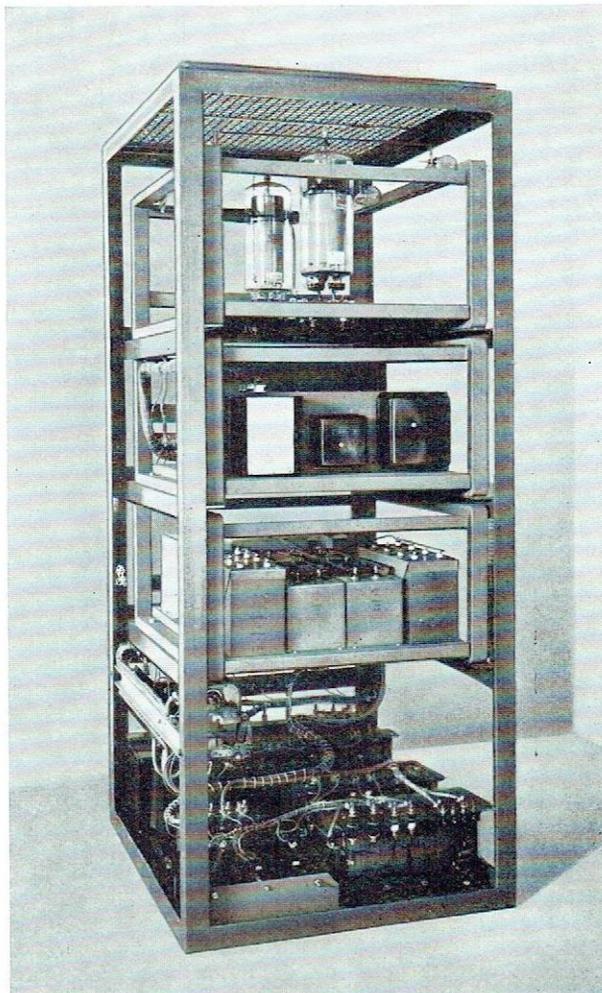


Fig. 89. — Générateur de tension alternative 50 Hz à partir d'un réseau à courant continu, équipé de thyratrons PL 255. Réalisation N.O.R. Salon.

cette phase de fonctionnement. Cette précaution évitera l'accroissement de l'émission de grille par excès de puissance dissipée sur cette électrode, ainsi que l'éclatement de surface du métal de la grille. Elle permettra de supprimer également les déplacements de caractéristiques de commande dus aux variations

de la tension de contact, ce qui empêchera une rapide adsorption du gaz dans le cas des tubes à remplissage gazeux.

Dans les montages où la grille de commande est maintenue négative, pendant que l'anode est conductrice, le choix convenable de la résistance disposée en série avec la grille permettra de conserver une polarisation réelle de grille plus positive que  $-10$  V. La valeur *minimale* admissible de la résistance de grille est le dixième de la valeur de la résistance recommandée dans les feuillets de caractéristiques.

Dans les montages où la tension d'anode varie d'une valeur positive à une valeur négative, la tension de grille de commande étant positive, et en présence d'un courant cathodique, il y aura un petit courant ionique positif qui circulera vers l'anode. Aux tensions d'anode fortement négatives, il est tout à fait indispensable de limiter l'importance du courant ionique positif grâce à une restriction très sévère du courant circulant de la cathode à la grille. Cela peut être obtenu par l'utilisation de la résistance *maximale* admissible, en série dans la grille. Mais il est préférable d'utiliser, à cet effet, une polarisation négative de grille *fixe* et une impulsion d'amorçage *positive* et très étroite.

Dans les applications faisant intervenir des montages où la tension de l'anode varie très rapidement d'une valeur positive à une valeur fortement négative, tels que ceux qui fournissent de l'énergie à des charges inductives à partir d'alimentations polyphasées, il y aura des ions positifs résiduels dans le tube qui seront accélérés vers l'anode avec une énergie très notable. Dans le cas des tubes à remplissage gazeux, cela peut produire une adsorption du gaz excessive et il faut alors tenir compte en toute rigueur des limitations imposées par le facteur de commutation (voir 8.20).

#### 4.40. Circuits d'excitation de la grille.

On doit utiliser de préférence une forte valeur de la tension d'excitation afin de maintenir aussi constant que possible l'instant exact de l'amorçage. On peut conseiller d'utiliser, à l'excitation, une polarisation de grille négative de 20 à 50 V, sur laquelle on superposera une étroite impulsion positive de grille.

L'amplitude de l'impulsion de grille doit être comprise entre 70 et 100 V pour une résistance de grille de 20 000 ohms et une impédance maximale du transformateur d'impulsions de 30 k $\Omega$ . Si l'on utilise une tension de grille sinusoïdale, on suivra les indications ci-après :

La tension d'excitation doit être de huit fois l'étalement de la caractéristique de commande, soit de 30 à 50 V efficaces, dans le cas d'une charge inductive ou résistive sans force contre-électromotrice. Si une force contre-électromotrice est présente, la valeur de la tension d'excitation doit être d'au moins quinze

fois l'étalement, c'est-à-dire la dispersion de la caractéristique de commande (soit de 50 à 100 Veff).

### 5. Alimentation du filament.

La tension du filament doit être maintenue dans les limites indiquées par les feuillets de caractéristiques pour avoir un fonctionnement correct et assurer une longue durée de vie. Si la tension d'alimentation est trop élevée, la température de la cathode est excessive et il en est de même du taux d'évaporation de la matière émissive. Une partie de cette matière se dépose alors sur la grille et, comme la température de celle-ci est également élevée en raison du rayonnement thermique de la cathode, il peut alors se produire une émission de grille excessive, capable de provoquer la perte de commande de la grille.

Si, par ailleurs, la tension de chauffage est trop basse, il en est de même de la température de la cathode et l'émission électronique se trouve réduite. Il en résulte une augmentation de la tension d'arc et il peut se produire des éclatements de surface de la cathode qui réduisent sérieusement la durée de vie du tube. Par conséquent, il est très important de régler la tension de chauffage à sa *valeur correcte*. Lorsque l'on se propose de vérifier cette tension, spécialement dans le cas des grands tubes, il faut que la mesure soit faite aux broches mêmes du tube, plutôt qu'aux contacts du support. La tension de chauffage doit être réglée à  $\pm 2,5$  % de la valeur nominale fixée. Malgré cela, le tube peut admettre des fluctuations de secteur temporaires de  $\pm 6$  %.

Avec les tubes à chauffage direct, la portion de la cathode qui présente la plus grande différence de tension maximale par rapport à l'anode, a toujours tendance à être surchargée. Pour obtenir la durée de vie maximum des tubes, il convient d'éliminer cet effet. Il suffit, pour cela, d'alimenter le filament par une tension alternative qui soit en écart de phase de 90° avec l'alimentation de l'anode.

#### 5.10. Temps de préchauffage.

Avant d'obtenir la circulation d'un courant cathodique, il est indispensable que la cathode ait atteint sa température de fonctionnement complète, c'est-à-dire qu'elle soit capable de fournir son émission spécifiée. Cette condition est atteinte au bout du temps de préchauffage qui est le temps *minimal* exigé par la cathode pour son échauffement.

Dans le cas des thyatron à remplissage gazeux, cette condition est la seule à observer, car, dans ces tubes, la pression gazeuse est *sensiblement constante* pour toute la gamme des températures ambiantes admissibles. Dans le cas d'un thyatron à vapeur de mercure, toutefois, il faut aussi que la température de la vapeur de mercure condensée atteigne la valeur

minimale qui est indiquée dans les caractéristiques du tube, avant que l'on puisse faire circuler un courant cathodique. En effet, cette température détermine la pression de la vapeur de mercure et ses possibilités de conduction de courant. Si l'on essaye d'obtenir le courant cathodique maximal de crête spécifié à une température du mercure relativement réduite, la tension d'arc du tube augmente. Cela peut produire un bombardement de la cathode et une réduction de la durée de vie du tube. Le temps nécessaire pour atteindre une température donnée du mercure condensé, après l'instant de la mise en route de l'alimentation du filament, peut être déterminé d'après les données des caractéristiques. Si, par exemple, la température minimale spécifiée pour le mercure condensé est de  $40^{\circ}\text{C}$  et que la température ambiante soit de  $18^{\circ}\text{C}$ , il faut élever la température du mercure condensé de  $40^{\circ}\text{C} - 18^{\circ}\text{C} = 22^{\circ}\text{C}$ , avant de faire circuler le courant cathodique. Le terme « température ambiante » est assez mal défini si on l'applique aux conditions qui règnent au voisinage immédiat du tube électronique. Par conséquent, il est préférable de raisonner seulement d'après la température du mercure condensé et de mesurer cette température dans les conditions mêmes du fonctionnement. Le dispositif pour la mesure de température doit avoir une faible capacité thermique. Ce sera, par exemple, un thermocouple à fils fins. On le fixera sur le tube de telle sorte qu'il trouble aussi peu que possible le mode normal de la dissipation thermique.

Si l'on doit faire fonctionner un thyatron à vapeur de mercure avec un courant de crête inférieur au maximum spécifié, il est alors admissible de faire travailler le tube à une température du mercure condensé légèrement réduite. On pourra communiquer, sur demande, les réductions de température admissibles pour les différents thyatrons.

En général, il n'est pas indiqué de s'en remettre à la prudence d'un opérateur pour ménager le délai nécessaire entre la mise en route de l'alimentation du filament et le moment où l'on admet un courant cathodique dans le thyatron. Il est bien préférable d'utiliser un temporisateur automatique; pour les délais courts, on utilisera un temporisateur électronique. On reviendra plus loin sur les temporisateurs utilisables dans d'autres cas. Un tel dispositif peut fonctionner de deux manières différentes. On peut l'employer pour fermer le circuit d'anode du thyatron après le délai envisagé; dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser un contacteur de forte puissance. Une autre méthode consiste à réunir toutes les alimentations au thyatron simultanément, mais en lui appliquant, au départ, une tension de grille négative très élevée permettant d'éviter l'amorçage. Le montage de temporisation supprimera ensuite cette polarisation et permettra au thyatron de fonctionner à l'instant voulu.

## 6. Temps d'ionisation et de désionisation.

### Limite concernant la fréquence maximum.

Lorsque la tension de la grille atteint la valeur critique et que le thyatron commence à conduire un courant, la tension d'anode ne tombe pas instantanément de la tension d'alimentation à la tension d'arc. Le temps nécessaire pour atteindre la tension d'arc est appelé : *temps d'ionisation*. Il dépend de la valeur du signal de grille et aussi de la structure mécanique des électrodes et de la nature du remplissage gazeux du thyatron.

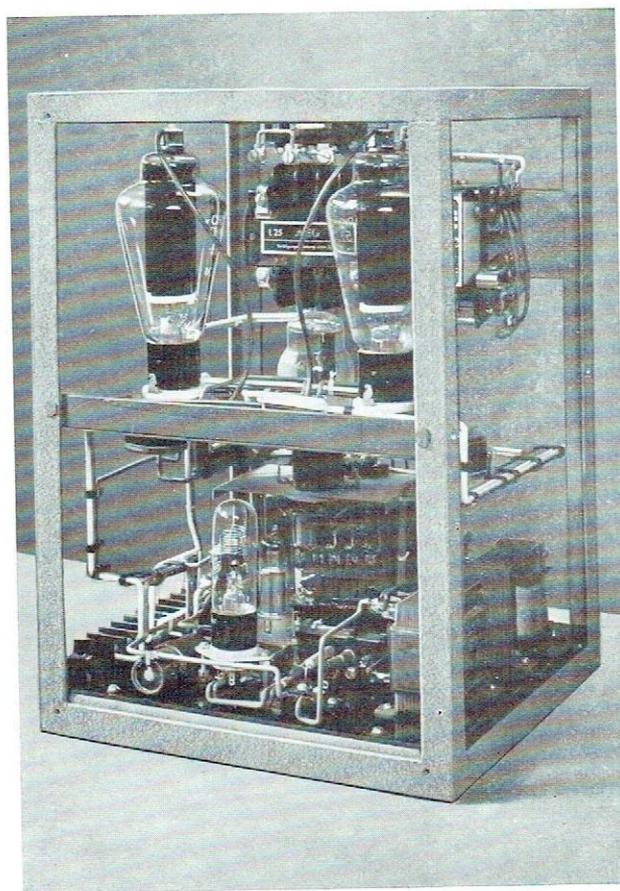


Fig. 90. — Régulateur électronique de tension équipé de thyatrons PL 5559 pour l'alimentation d'ozoniseur (traitement des eaux de ville). Document : Transformateurs B. C.

Lorsque la tension de l'anode descend au-dessous de la tension d'arc, les ions positifs ne sont pas neutralisés instantanément. Ces ions positifs sont répartis dans l'espace qui entoure la grille et forment une gaine qui empêche la grille de commander la formation d'un arc. Après un certain temps, appelé : *temps de*

désionisation, la densité ionique a diminué d'une manière suffisante et la grille peut reprendre la commande du tube. Les temps d'ionisation et de désionisation sont, tous deux, fonctions des tensions des électrodes, des dimensions du tube et de la nature du gaz de remplissage. En général, de fortes tensions négatives appliquées à la grille et à l'anode aident considérablement si l'on veut obtenir une désionisation rapide. Toutefois, les avantages acquis de cette manière peuvent n'être pas absolument nets. Ces tensions peuvent donner lieu à des éclatements de surface et à une adsorption sur les électrodes.

Le temps de désionisation fixe donc une limite de la fréquence maximale à laquelle le thyatron peut fonctionner. Si les périodes de non-conduction sont plus courtes que le temps de désionisation, la grille n'est pas capable de reprendre la commande lorsque cela serait nécessaire et le thyatron fonctionne alors comme un redresseur, à grille non commandée. D'une façon générale, les thyatrons à vapeur de mercure ont une limitation de la fréquence maximale de 500 Hz, environ, imposée par le temps de désionisation, tandis que les thyatrons à remplissage gazeux (xénon) ne perdent la commande que pour des fréquences de l'ordre de 5 kHz. Il convient de remarquer que l'on trouvera pour certains thyatrons une limite de fréquence beaucoup plus faible. Cette limite, spécifiée dans les feuillets de caractéristiques, tend à éviter l'adsorption et l'éclatement de surface des électrodes.

Les temps d'ionisation et de désionisation dépendent à la fois du montage et des tensions employées; tous les calculs théoriques qui font usage de ces temps doivent toujours être examinés avec une certaine précaution, avant de les appliquer à la pratique.

## 7. Conditions d'utilisation correctes.

L'ampoule et les électrodes métalliques sont construites pour assurer une durée de fonctionnement pratiquement illimitée. Il existe deux autres éléments dont la durée est conditionnée par une utilisation correcte : la cathode et, lorsqu'on n'emploie pas la vapeur de mercure, le remplissage gazeux.

### 7.10. Chauffage direct.

Afin d'obtenir le maximum de durée de vie des tubes à chauffage direct, on utilisera un transformateur de chauffage à prise médiane et l'on devra obtenir, de préférence, un déphasage de  $90^\circ \pm 30^\circ$  entre la tension alternative d'anode  $V_a$  et la tension du filament  $V_f$ . Si l'on indique dans les caractéristiques des tolérances relatives à la tension de chauffage, il faut prendre toutes les dispositions nécessaires pour éviter que la tension de chauffage dépasse ces limites, que l'écart soit dû à des tolérances excessives du

transformateur, à des fluctuations de la tension du secteur ou à des causes quelconques. La tension de chauffage doit être mesurée pour la tension nominale du réseau et sur les sorties mêmes du tube. Si l'on n'indique pas de tolérance sur la tension de chauffage, on peut accepter en général des écarts maximaux de  $\pm 2,5\%$  autour de la valeur publiée.

On recommandera par conséquent, d'utiliser des transformateurs de chauffage à prises. Les fluctuations du secteur ne doivent pas en général dépasser 5 %, mais les fluctuations de 10 %, de courte durée, sont admissibles. Pour le calcul des spécifications du transformateur de chauffage, il faudra tenir compte du fait qu'une variation du courant de filament de  $\pm 10\%$  peut se produire entre deux tubes d'un même type. Pour les tubes à chauffage direct, il y aura lieu également de tenir compte du courant continu circulant dans l'enroulement de chauffage.

### 7.11. Cathode.

Les cathodes sont recouvertes d'oxydes, dans les deux sortes de thyatrons. En l'absence de bombardement par des ions positifs rapides, ces cathodes durent très longtemps. Il est donc indispensable que la tension d'arc ne puisse jamais dépasser la valeur spécifiée pour chaque tube. Une tension d'arc trop élevée se produit si l'on exige un courant cathodique de crête trop fort, si l'on ne respecte pas les tolérances fixées pour les variations de la tension de chauffage ou si l'on fait circuler un courant avant que la cathode ait été préchauffée correctement. Dans le cas d'un thyatron à vapeur de mercure, il est également indispensable de s'assurer que la température de mercure condensé se trouve bien entre les limites indiquées.

### 7.20. Remplissage gazeux et adsorption.

Si l'on applique à un instant quelconque une tension élevée entre deux électrodes du tube, en présence d'un nombre important d'ions actifs ou résiduels, on risque d'endommager le tube. En effet, ces ions sont accélérés vers l'électrode négative et ils vont se trouver occlus dans le métal de l'électrode, ce qui réduit la pression du gaz dans l'ampoule. L'impact des ions accélérés détériore localement l'électrode et peut écailler visiblement sa surface. Dans les tubes à remplissage gazeux, le volume gazeux à l'origine est déjà limité. Si l'on en adsorbe une grande proportion, le rendement du tube baisse en proportion. Il faut donc que le montage et ses conditions de fonctionnement ne puissent pas provoquer l'adsorption.

En ce qui concerne le circuit principal, d'anode à cathode, l'adsorption peut se produire surtout au moment de l'extinction de la décharge, lorsqu'une tension inverse est fréquemment appliquée aux bornes de ce circuit. L'adsorption gazeuse sera faible, dans ce cas, si le facteur de commutation spécifié pour le tube n'est pas dépassé.

Le facteur de commutation est, par définition, le produit du taux de décroissance du courant anodique par le taux d'accroissement de la tension inverse, en volts par microseconde (mesuré sur le premier accroissement de 200 V). Le taux de décroissance du courant anodique est évalué en ampères par microseconde, et mesuré pendant les 10 microsecondes qui précèdent la coupure du courant.

Aux fréquences du secteur usuelles, les montages où l'on applique une tension inverse sinusoïdale n'exigent pas un grand facteur de commutation pour bien fonctionner. Par exemple, on considérera un montage monophasé fonctionnant à partir du secteur sinusoïdal et alimentant une charge purement résistive. Si le courant anodique de crête est de 80 A et la tension inverse de crête de 1 500 V, le facteur de commutation, à 5 kHz, sera de l'ordre de 120.

Dans quelques applications, cependant, un premier thyatron devient complètement conducteur avant que l'autre alimente la charge. A cet instant, une forte tension inverse se trouve appliquée à l'anode du premier thyatron. Ce cas se présente dans les montages mutateurs (inverters) et aussi dans les montages de thyatrons sur des courants polyphasés, alimentant des charges inductives. Dans ce cas, le montage impose, en général, un grand facteur de commutation.

Si ce facteur est excessif, on peut y remédier à l'aide d'un montage amortisseur (voir 8.30).

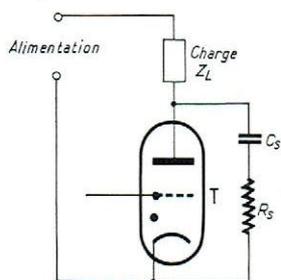


Fig. 91

La figure 91 indique le schéma de principe de l'un de ces montages. Il consiste à disposer en parallèle sur l'espace anode-cathode du thyatron un circuit comprenant un condensateur  $C_S$  et une résistance  $R_S$ , reliés en série. La réactance du condensateur  $C_S$  ainsi que l'impédance de la charge  $Z_L$  empêchent l'application au thyatron de toute variation brusque de la tension. Ils tendent aussi à compenser toute décroissance rapide du courant dans la charge  $Z_L$ . La présence de la résistance  $R_S$  est nécessaire; elle évite la circulation d'un courant cathodique de crête excessif, au moment où le condensateur se décharge dans le thyatron.

Lorsque ce dernier fonctionne à des fréquences élevées (1), il devient extrêmement utile d'éviter un

(1) Nous pensons particulièrement à l'utilisation des thyatrons sur des secteurs à 400 Hz.

trop grand facteur de commutation car, s'il se produit une adsorption du gaz, son effet cumulatif est proportionnel à la fréquence. C'est pour cela qu'une limite supérieure de la fréquence de fonctionnement a été fixée pour certains thyatrons de faible puissance, au lieu d'un facteur de commutation à ne pas dépasser.

Certaines dispositions de montages conduisent plus facilement au danger d'adsorption. La commande verticale tend à donner ce genre de difficultés, car un courant circule entre grille et cathode aux instants où l'anode est portée à une tension négative. Cette situation se présente lorsque la décharge principale vient de s'éteindre. Les caractéristiques spécifient donc assez souvent le courant de grille positif que l'on peut admettre en toute sécurité lorsque l'anode devient plus négative que  $-10$  V. De même, si la grille est portée à une tension plus négative que  $-10$  V pendant la durée de la conduction principale (anode-cathode), la grille est alors bombardée par des ions positifs. Il faut donner à la résistance de grille une valeur suffisamment grande, mais non trop grande, pour maintenir la tension de grille entre les limites spécifiées.

Les thyatrons à vapeur de mercure ne présentent pas l'inconvénient de l'adsorption du gaz mais doivent être protégés contre les chocs ioniques. Si l'on augmente rapidement la tension négative d'une électrode en présence d'ions positifs, ces ions se trouvent fortement accélérés dans la direction de cette électrode négative. Les ions sont des corpuscules de grande masse relative et ils peuvent endommager l'électrode qu'ils viennent ainsi frapper. On fixe donc, en général, une fréquence maximale de fonctionnement de l'ordre de 150 Hz pour cette catégorie de thyatrons, alors que la seule considération du temps de désionisation aurait permis de fixer une fréquence limite de l'ordre de 500 Hz.

Les procédés modernes de fabrication et de formation assurent aux thyatrons actuels, employés correctement selon les caractéristiques, une très longue durée de vie. Si cette durée est l'objectif principal du constructeur, il aura soin de se tenir dans son projet à 80 % seulement des tensions efficaces et des courants moyens indiqués. Il réduira ainsi les contraintes thermiques de la structure interne et il éloignera beaucoup la possibilité de la naissance d'une émission de la grille. En cas de mauvaise utilisation temporaire du tube, tout risque de détérioration se trouve ainsi assez bien écarté, si les tubes fonctionnent constamment selon ces conditions réduites.

L'utilisation peut devenir temporairement incorrecte si le secteur électrique présente une élévation de tension qui produit un dépassement de la tension de chauffage tolérée. On comprend que si l'appareil est prévu à 80 % de la charge normale du thyatron pour la tension nominale du secteur, la tension de

chauffage, temporairement trop grande, sera la seule surcharge, la tension d'anode étant alors, au plus, celle de la spécification à ne pas dépasser. Dans le cas des thyratrons à vapeur de mercure, il convient

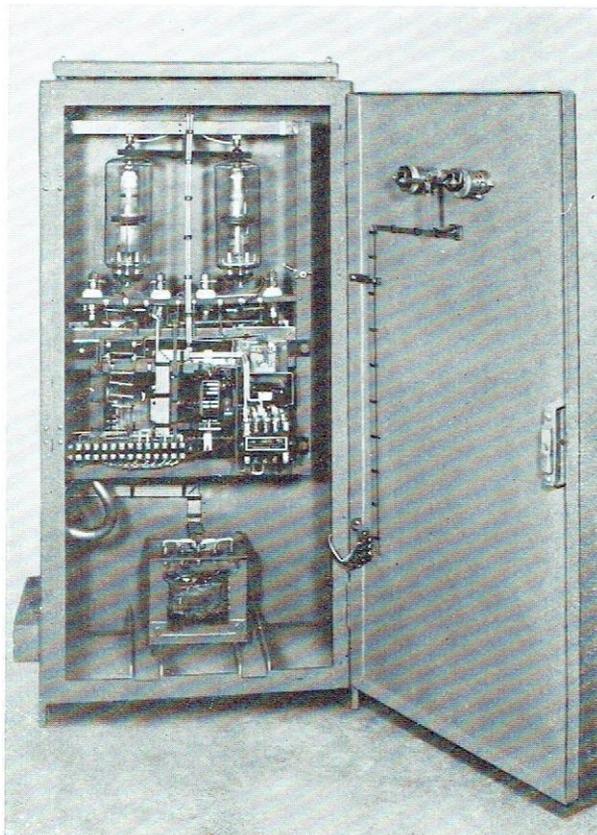


Fig. 92. — Variateur électronique, équipé de thyratrons PL 150, pour moteur à courant continu de 1,5 kw. Réalisation Nervus, Paris.

de réchauffer extérieurement les tubes, dans les périodes de grand froid, afin de ne jamais les faire fonctionner dans les conditions d'une température ambiante trop basse.

La durée de vie et le fonctionnement satisfaisant des thyratrons dépendent de deux considérations indispensables :

1° les tensions appliquées aux électrodes et le courant dans l'arc.

2° la nature (forme et fréquence) des tensions et des courants et leurs temporisations. Ce dernier point est en général conditionné par la nature exacte de la charge d'utilisation.

Il est donc difficile de prévoir ce que sera la fatigue du tube dans une application donnée, si l'on n'a pas relevé, *en détail*, toutes les conditions de fonctionnement.

### 7.30. Effets de la température.

1° Tubes à vapeur de mercure ou à remplissage mixte : vapeur de mercure et gaz rare.

Pour ces types de tubes, les feuillets de caractéristiques indiquent toujours les limites de la température du mercure condensé. Il faut que la température en fonctionnement soit surveillée et reste entre ces limites. Une température trop basse donne une pression gazeuse insuffisante, de trop faibles possibilités de débit, une forte chute de tension d'arc et, par conséquent, une réduction de la durée de vie. Une trop forte température provoque une forte pression gazeuse qui réduit la tension d'arc inverse mais oblige à diminuer également les tensions directe et inverse de crête admissibles. La température du mercure condensé peut être mesurée à l'aide d'un thermo-élément fixé contre l'ampoule, sur la région la plus froide de celle-ci, où le mercure se condense. Ce point est généralement situé juste au-dessus de l'embase ou des pattes de fixation.

Les thyratrons à vapeur de mercure ne peuvent pas être employés sans précautions dans un aussi large domaine de températures ambiantes que les thyratrons à remplissage gazeux. En effet, si la température du mercure condensé est trop basse, le tube ne peut fournir le courant spécifié et, si elle est trop élevée, le tube ne peut tenir sous la tension de crête maximale d'emploi fixée. La gamme des températures d'emploi des thyratrons à vapeur de mercure s'étend de 15 °C environ à 50 °C.

Les mesures précises à l'aide de thermo-éléments exigent l'emploi d'appareils de mesure de bonne fabrication. En dehors des limites de température pour le mercure condensé, on indique parfois également celles de la température ambiante. Ces données sont surtout destinées à guider l'utilisateur, car la différence entre la température ambiante et celle du mercure condensé dépend dans une large mesure de la disposition du montage et des possibilités de refroidissement.

*Dans tous les cas c'est la température du mercure condensé qu'il importe surtout de maintenir dans les limites fixées.*

La température ambiante peut être mesurée à l'aide d'un thermomètre, que l'on doit protéger contre le rayonnement thermique direct. La mesure doit être pratiquée en différents endroits autour de la paroi du tube.

2° Tubes à remplissage gazeux.

Pour ces tubes, les feuillets n'indiquent que les

limites de la température ambiante. En général, ces limites sont : minimum  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  et maximum  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Le temps de préchauffage relativement court de cette catégorie de thyratrons présente également des avantages particuliers.

#### 7.40. Montage.

a) *Thyratrons à vapeur de mercure* : montage et stockage, en position verticale seulement.

b) *Thyratrons à remplissage gazeux* : montage et stockage suivant une orientation quelconque. Ces thyratrons sont donc particulièrement recommandés pour les installations mobiles.

Normalement, les tubes doivent être montés verticalement avec l'embase ou les pattes de fixation vers le bas. Il faut les disposer en un endroit où l'air peut circuler librement autour de l'ampoule. Si un refroidissement supplémentaire est nécessaire, on peut adjoindre à la convection naturelle un dispositif de refroidissement par air forcé. Ce dernier point présente la plus grande importance pour l'utilisation des tubes à vapeur de mercure. Avec ceux-ci, en effet, il est nécessaire d'obtenir la condensation du mercure dans la partie inférieure de l'ampoule. La distance à maintenir entre les tubes et les autres pièces d'un appareil, ou entre les tubes et le coffret, doit être au minimum de la moitié du diamètre maximum du tube.

Si l'on utilise deux tubes, ou un plus grand nombre, l'écartement entre les ampoules doit être, environ, trois quarts du diamètre maximum du tube. Si le tube est installé dans un coffret métallique fermé, il faut tenir compte de la chaleur dissipée par le tube et par les autres pièces. Pendant que le tube fonctionne, il ne doit être en contact avec aucune autre partie de l'installation. Il ne faut pas non plus qu'il puisse recevoir à l'emplacement choisi des chutes de liquides quelconques. Les tubes doivent être supportés de telle manière qu'ils ne soient pas soumis à des vibrations ou à des chocs dangereux. En général, si la vibration ou le choc peut dépasser 0,5 g, un dispositif antivibratoire doit obligatoirement être utilisé sous les supports.

Les connexions aux électrodes, sauf celles qui se font sur le support de tube, doivent être faites par câbles souples. Les bornes, par exemple celles des connexions d'anode, doivent être bien serrées, mais il convient de ne pas exercer une force trop grande à l'instant du serrage. Les contacts doivent être vérifiés à intervalles réguliers et leurs surfaces doivent être maintenues propres afin d'éviter un échauffement excessif des scellements verre-métal. La section des conducteurs doit être suffisante pour que le transport de la valeur efficace du courant se fasse sans chute de tension appréciable.

Il convient de noter à ce sujet que, dans les mon-

tages de redresseurs à grille commandée, la valeur efficace du courant anodique peut atteindre 2,5 fois la valeur moyenne de la composante continue, et, parfois même, une valeur sensiblement plus grande.

#### 7.41. Protection contre les courts-circuits.

On donne dans les caractéristiques la valeur du courant de court-circuit maximal afin d'éviter que l'on puisse endommager le tube par la circulation d'un courant de crête trop élevé. La valeur du courant de court-circuit est seulement destinée à guider le constructeur dans l'établissement de son projet. C'est la valeur maximale du courant accidentel qui résulterait d'une brusque surcharge ou d'un court-circuit. Il peut circuler dans le thyatron pendant une durée n'excédant pas 0,1 s sans produire sa destruction immédiate. Plusieurs surcharges de cette nature peuvent réduire considérablement la durée de vie du tube. Dans l'établissement du projet, il faut tenir compte de la spécification du courant de crête maximal, lorsque l'on calcule l'impédance de court-circuit de l'appareil.

*La valeur du courant de court-circuit accidentel ne doit pas être interprétée comme celle d'un courant de crête qui pourrait se produire à la mise en route ou pendant le fonctionnement.*

Une méthode simple pour limiter le courant accidentel à sa spécification maximale consiste à incorporer une résistance, en série dans le circuit anodique.

#### 7.42. Blindages et interférences.

Afin d'éviter une ionisation indésirable du remplissage gazeux par des champs HF intenses, pouvant produire une décharge inverse, il peut être nécessaire, dans ce cas particulier, d'enfermer le thyatron dans un coffret de blindage séparé, relié à la terre.

Dans les montages utilisant les tubes à remplissage gazeux, il peut se produire des oscillations dans les bobinages du transformateur ou dans d'autres éléments du montage. Elles pourraient parfois produire des tensions inverses de crête excessives et même un arc en retour. Il convient d'amortir ces oscillations, spécialement si l'appareil fonctionne à des tensions élevées. Des montages d'amortissement parallèle à résistance et condensateur peuvent être utilisés à cet effet (voir 8.30, page 43).

#### 7.50. Mise sous tension.

1° *Tubes à vapeur de mercure ou tubes à vapeur de mercure avec gaz rare.*

Il est nécessaire de laisser chauffer la cathode afin qu'elle atteigne progressivement sa température de fonctionnement. On applique seulement ensuite la tension d'anode. Le temps de préchauffage est indiqué

dans les feuillets de caractéristiques. La tension d'anode peut être alors mise en circuit à la fin de ce temps de préchauffage, si la température du mercure condensé n'est pas trop basse. On peut fermer le circuit, si la température du mercure condensé est à 5 ou 10° au-dessous de la température minimale publiée. Mais il faut toujours observer le temps de préchauffage. Après un transport quelconque du tube, il ne faut pas faire de mise en service sans tenir compte du temps de préchauffage et de la température prescrite pour le mercure condensé. Les indications qui viennent d'être données concernant le transport sont également valables après un long arrêt de fonctionnement et, pour ces deux cas, on fera bien de suivre en détail les instructions d'emploi que l'on trouve dans l'emballage du tube.

Afin d'éviter des temps de préchauffage assez longs, on peut conseiller de laisser les filaments en circuit pendant les périodes de repos de l'installation, par exemple la nuit, sous une tension réduite à 60 ou 80 % de la tension nominale de chauffage.

#### 2° Tubes à remplissage gazeux.

Avant de pouvoir obtenir un courant cathodique, il est nécessaire de préchauffer la cathode pour qu'elle atteigne sa température de fonctionnement. On doit respecter le temps de préchauffage indiqué. On peut ensuite appliquer la tension d'anode si la température ambiante n'est pas inférieure à la valeur minimale des limites de température indiquées.

### 7.60. Montage de filtres (inductance préalable).

Dans un redresseur, si l'on veut limiter le courant anodique de crête, il est nécessaire d'insérer une bobine de filtrage avant le premier condensateur d'adoucissement. Pour assurer une bonne régulation de tension, dans le cas de charges fluctuantes, l'inductance propre de cette bobine doit être assez grande pour fournir, de façon ininterrompue, le courant correspondant à la charge minimale. La bobine et le condensateur ne doivent être en résonance ni sur la fréquence du secteur ni sur celle de l'ondulation. Dans les montages de redresseurs à grille commandée, lorsque les conditions correspondent au voisinage de la phase inverse, le contenu harmonique de la tension continue de sortie sera grand, si la bobine de filtre n'a pas été correctement déterminée.

### 7.70. Fonctionnement en parallèle de tubes à remplissage gazeux (remarques).

Les divers échantillons d'un même type de thyatron à remplissage gazeux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes. On ne doit donc pas relier en parallèle directement deux tubes ou un plus grand nombre de tubes. Si l'on désire obtenir un courant de tube plus élevé il convient d'adopter un autre

procédé. Des informations sur les méthodes qui conviennent pour ce cas seront fournies sur demande.

## 8. Mesures sur les thyatrons.

### 8.10. Oscillographie.

Pour la mise au point des montages à thyatrons, on utilisera de préférence un oscillographe muni d'un amplificateur de tensions continues. Il est avantageux que l'on puisse aussi appliquer les tensions à mesurer directement sur les plaques de déviation. L'usage d'un commutateur électronique permettant d'observer simultanément deux courbes (de tension ou de courant) est aussi d'un très grand secours pour connaître le fonctionnement avec précision. Cela permet d'observer, en particulier, le comportement du circuit de la grille, en fonction des tensions appliquées à l'anode. Ces données sont indispensables si l'on veut déterminer la valeur de la résistance de grille et des éléments amortisseurs capables d'assurer un fonctionnement stable et sans défaut. Les capacités ajoutées par la liaison à l'oscillographe doivent rester faibles, si les mesures sont faites sur un circuit de grille à forte résistance. Si l'utilisation de fil blindé est essentielle, la ligne de mesure devra être courte et constituée par un câble à faible capacité par unité de longueur.

### 8.20. Mesure du facteur de commutation.

Pour mesurer le facteur de commutation obtenu avec un montage donné, il faut observer la tension de l'anode et le courant anodique pendant 30  $\mu$ s, environ,

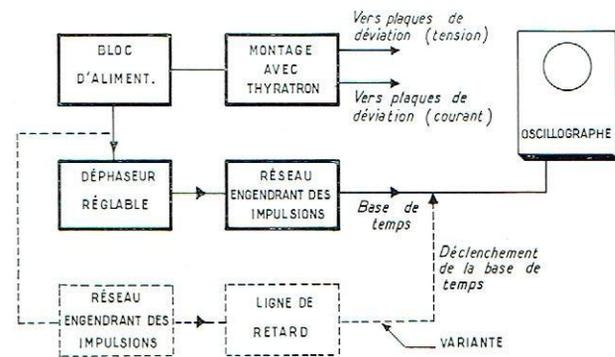


Fig. 93

autour de l'instant de la commutation. Il faut donc utiliser une base de temps à la fréquence correspondante, permettant cette observation, et la synchroniser par un signal déclencheur à l'instant opportun. Ce signal est habituellement fourni par la tension du secteur que l'on applique, après transmission dans

une ligne de retard ou dans un réseau déphaseur, aux bornes de l'oscillographe (voir la figure 93).

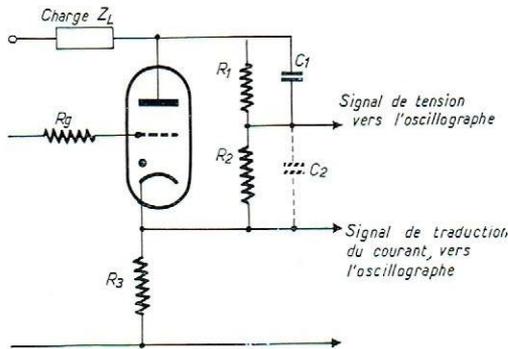


Fig. 94

En général, le signal correspondant à la tension à examiner doit être affaibli par un diviseur de tension du genre de celui de la figure 94. L'effet de la capacité d'entrée,  $C_2$ , de l'oscillographe doit être compensé par  $C_1$ . On doit donc avoir :

$$C_1 \times R_1 = C_2 \times R_2.$$

Pour observer la forme d'onde du courant, on utilise la résistance  $R_3$ , de faible valeur ohmique. La base de temps de l'oscillographe doit être étalonnée avec soin afin que l'on puisse déterminer facilement, sans calcul auxiliaire, les taux de variation des courants et des tensions en fonction du temps.

### 8.30. Montages amortisseurs.

Dans un redresseur à commande par la grille, la tension inverse maximale dépend du montage employé et des tensions au secondaire du transformateur (1).

La tension inverse initiale  $V_i$ , celle qui se produit dès que le tube n'est plus conducteur, dépend de l'angle de retard de phase du circuit de grille. Cette tension est faible pour les petits angles et la tension inverse maximale se produit à un moment où l'ionisation résiduelle est négligeable. Avec de grands angles de retard, la tension inverse tend à devenir sensiblement égale à la tension inverse de crête. On dispose alors d'une forte tension pour produire le courant correspondant et l'ionisation à l'instant où  $V_i$  se produit est alors beaucoup plus grande que dans le cas des petits angles.

Ces résultats peuvent être observés sur les figures 95 (retard  $0^\circ$ ) et 96 (retard  $30^\circ$ ), dans le cas d'un redresseur triphasé, double étoile, avec bobines de réactance (bobines de compensation) entre phases.

Les périodes de commutation et les angles de recouvrement  $\mu_{1\Delta}$  et  $\mu_{2\Gamma}$  ont également été représentés sur ces figures.

(1) Rédigé d'après une étude de W.J. Saysell des Laboratoires Mullard à Mitcham, Grande-Bretagne.

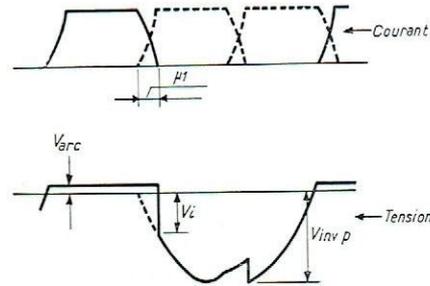


Fig. 95

Si l'on réunit les conditions d'une ionisation résiduelle appréciable et d'une grande tension inverse initiale, on peut considérer que cet ensemble de conditions accroît la probabilité de la formation d'un arc en retour dans les tubes à vapeur de mercure. En ce qui concerne les tubes à remplissage gazeux, le temps de désionisation étant plus court, le danger de l'arc en retour est évidemment réduit. Toutefois, les ions

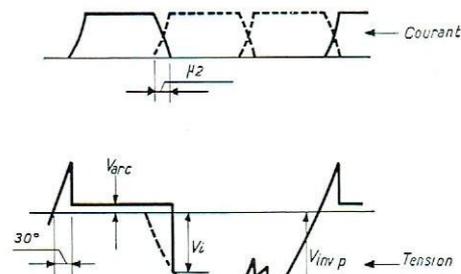


Fig. 96

positifs accélérés par la forte tension inverse peuvent bombarder l'anode avec une énergie suffisante pour pénétrer à l'intérieur du métal. Quelques-uns de ces ions sont alors adsorbés et une réduction du volume gazeux se produit. Comme il n'y a pas de réservoir permettant de restituer à la pression du gaz sa valeur initiale, le tube vieillit, dans ces conditions, assez rapidement. Jusqu'ici, on n'a pu utiliser un réservoir que dans les thyatron à hydrogène pour radars. Dans les thyatron à vapeur de mercure, on peut dire que la quantité de mercure liquide pourtant faible peut fournir sa vapeur presque sans limite.

### 8.40. Facteur de commutation.

Pour pouvoir estimer le danger d'adsorption auquel peut tendre un montage donné, on détermine son *facteur de commutation* dans lequel interviennent, simultanément, les courants et les tensions. Le facteur de commutation est, par définition, le produit du taux de décroissance du courant anodique (en ampères par microsecondes) par le taux d'élévation initial de la tension inverse (en volts par microsecondes). L'éléva-

tion de tension considérée est celle qui suit *immédiatement* la décroissance du courant. Les valeurs qui entrent en ligne de compte sont, d'une part, le taux moyen de décroissance sur les dernières 10 microsecondes de conduction et le taux moyen de l'élévation de la tension sur les premiers 200 V. Pour certains thyatron, le facteur de commutation admissible maximale est parfois indiqué dans les spécifications, sous la forme d'un nombre. Il faut alors savoir que l'unité est l' [ampère × volt) par microseconde<sup>2</sup>]. Les facteurs de commutation des différentes fabrications de thyatron se trouvent entre les deux valeurs extrêmes de 200 et de 0,66. Certains thyatron ont été étudiés pour fonctionner dans les conditions qui correspondent à un facteur de commutation très élevé. C'est, notamment, le cas des thyatron PL 5544 et PL 5545. Ces thyatron sont étudiés et construits en vue d'une bonne limitation du bombardement par les ions positifs, et les pressions gazeuses initiales que l'on peut utiliser dans ces tubes sont très élevées. On utilisera donc toujours, autant que possible, un thyatron spécifié pour un grand facteur de commutation.

### 8.50. Réduction du facteur de commutation.

On peut réduire le facteur de commutation en diminuant le taux de décroissance du courant, ou le taux de montée de la tension inverse, ou encore, en agissant sur ces deux grandeurs. Si l'on ajoute une inductance propre en série avec l'anode du thyatron, on réduit le taux de décroissance du courant  $di/dt$ , mais il en résulte une mauvaise régulation et une baisse du facteur de puissance. Cette adjonction tend aussi à accroître la valeur de la tension initiale inverse. On peut donner à ce problème une solution partielle si l'on constitue la réactance supplémentaire par des

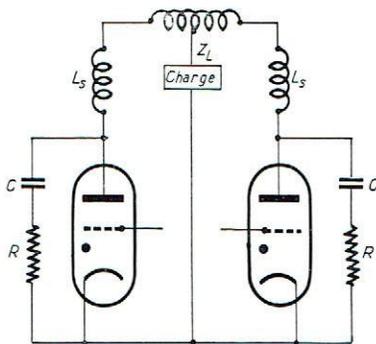


Fig. 97

bobines à noyaux saturables, étudiées pour que leur réactance ne soit réellement élevée qu'à une faible valeur donnée du courant.

Mais il est plus pratique de disposer un circuit comprenant en série une résistance et une capacité en

shunt entre l'anode et la cathode du tube, afin de diminuer le taux d'élévation de la tension initiale inverse. Ce dispositif est un *circuit amortisseur*. La figure 97 donne l'exemple d'un tel circuit [Bibliographie (1)]. Les valeurs des éléments sont choisies de telle sorte que l'adjonction de C et de R permet de former un circuit à l'amortissement critique avec la réactance existante du transformateur.

### 8.60. Équations des éléments amortisseurs.

Avec le montage de la figure 97 on obtient les équations suivantes :

$$\frac{R}{K} = \frac{4 L_s^2}{v_i^2} \times 10^6$$

et :

$$CK^2 = \frac{L_s}{(R/K)^2} \times 8 \times 10^3$$

Dans ces formules :

K = facteur de commutation,

R = résistance en ohms,

$L_s$  = inductance de dispersion par phase du transformateur, en mH,

C = capacité du condensateur en  $\mu$ F,

$v_i$  = tension initiale inverse.

### 8.70. Établissement des équations.

Afin de simplifier l'établissement des équations, on va d'abord considérer comme exemple un redresseur à commande par la grille avec un retard d'amorçage nul. Les expressions obtenues seront applicables à un amorçage temporisé, à condition d'utiliser une valeur appropriée de la tension initiale inverse et de faire que le fonctionnement n'entre jamais dans le domaine de la conduction discontinue [Bibliographie (2)].

Dans un montage redresseur polyphasé (fig. 98 et 99)  $v_a, v_b$  sont les tensions de deux phases adjacentes. Dans le cas d'un transformateur parfait (qui ne présenterait pas de réactance de fuite) il n'y aurait circulation de courant à un instant donné que dans un seul tube et le courant de ce tube tomberait rapidement à zéro à la fin de la période de conduction. Dans un vrai transformateur, on doit considérer l'inductance de phase qui se trouve réellement disposée en série, avec le conducteur d'anode. Cette inductance doit rendre plus lente la croissance aussi bien que la décroissance du courant. Si l'inductance de la charge est suffisamment grande, on peut estimer, à juste titre, que le courant de sortie est constant. Dans ce cas, lorsque le courant de la phase « passante » décroît, le courant de la phase « incidente » doit croître de telle sorte qu'à un instant quelconque durant la commutation, la somme des deux courants

soit constante. La durée de cette commutation est appelée « temps de recouvrement » et on la désigne par l'angle  $\mu$  correspondant.

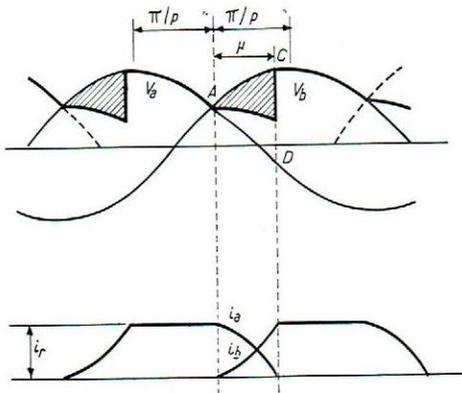


Fig. 98

### 8.80. Décroissance du courant.

Durant la commutation, les deux tubes sont conducteurs, les deux anodes doivent donc être portées à la valeur de la tension redressée  $v_r$ . Les différences

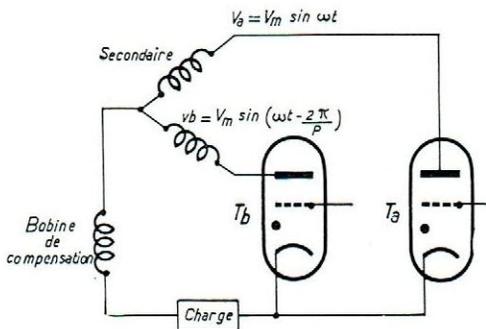


Fig. 99

entre  $v_r$  et les tensions des phases  $v_a$  et  $v_b$  sont absorbées par les inductances de dispersion respectives. Si l'on désigne par  $L_s$  (Henrys) l'inductance équivalente de fuite par phase et rapportée au secondaire, on a :

$$v_r = v_a - L_s \cdot \frac{di_a}{dt} = v_b - L_s \cdot \frac{di_b}{dt} \dots \dots (1)$$

On a négligé dans cette formule la chute de tension d'arc.

Pour une grande valeur de l'inductance de la charge d'utilisation, on obtient, à la sortie, un courant continu  $i_r = i_a + i_b$ . Par conséquent :

$$\left[ \frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} = 0 \right] \dots \dots \dots (2)$$

D'après les équations 1 et 2 :

$$2 v_r = v_a + v_b - L_s \left( \frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} \right) = v_a + v_b \dots (3)$$

ou encore :

$$v_r = \frac{v_a + v_b}{2} \dots \dots \dots (4)$$

Ainsi pendant la durée du « recouvrement », la tension redressée  $v_r$  est égale à la moyenne arithmétique des deux tensions des phases. La figure 98 montre l'angle du recouvrement entre les points A et B. Au point B, le transfert du courant est complètement terminé, c'est-à-dire, qu'en ce point  $i_a = 0$  et  $i_b = i_r$ . En ce point donc, la tension du redresseur croît brusquement à la valeur de la tension de phase

$v_b$  au point C, dès que l'on a  $\frac{di_b}{dt} = 0$ . Une tension

brusque initiale inverse  $v_i = CD$  est alors appliquée au premier tube à cet instant même. Rappelons que  $v_i = v_a - v_b$ . D'après l'équation (1) :

$$\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} = \frac{v_a - v_b}{L_s} \dots \dots \dots (5)$$

et en tenant compte de l'équation (2)

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{v_a - v_b}{2 \cdot L_s} \dots \dots \dots (6)$$

Cette relation est valable à un instant quelconque pendant la durée de commutation. Ainsi, juste avant l'extinction du premier tube :

$$\frac{di_a}{dt} \approx \frac{v_a - v_b}{2 \cdot L_s} = \frac{v_i}{2 \cdot L_s} \dots \dots \dots (7)$$

car au point B, on a  $v_i = v_a - v_b$ . On pourrait établir l'équation (7) par des méthodes plus rigoureuses, mais l'approximation ci-dessus suffit à notre propos.

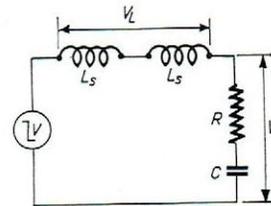


Fig. 100

### 8.90. Taux de croissance de la tension inverse.

Dans le circuit avec amortissement critique de la figure 100, on peut calculer le courant après  $t$  secondes par la formule :

$$i = \frac{V}{L} \cdot t e^{-\frac{(R/2L)t}{L}} \dots \dots \dots (8)$$

Dans cette formule  $L$  est en henrys,  $C$  est en farads et  $R$  en ohms. Quant à  $V$ , c'est un échelon de tension unité appliqué au temps initial  $t = 0$ . Si l'on désigne par  $v$  la tension aux bornes de l'ensemble constitué par  $C$  et par  $R$ , et par  $v_L$  la tension sur l'impédance  $Z$ , on peut écrire :

$$v = V - v_L = V - L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (9)$$

Si l'on différentie l'équation (8) et que l'on tienne compte de l'équation (9), on obtient :

$$v = V \left[ 1 - e^{-\left(\frac{R}{2L}\right)t} \left( 1 - \frac{R}{2L} t \right) \right] \dots (10)$$

Par conséquent :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{V}{L} \cdot e^{-\left(\frac{R}{2L}\right)t} \cdot \left[ \frac{R}{2} + \frac{R}{2L} \cdot \left( L - \frac{Rt}{2} \right) \right] \dots (11)$$

Ainsi pour un échelon de tension unité de  $V = v_i$  au temps  $t = 0$

$$\frac{dv_i}{dt} \approx \frac{v_i R}{L} \dots\dots\dots (12)$$

Dans le montage redresseur,  $Z = 2 L_s$ , mais il n'y a qu'un circuit « résistance et capacité » en service, l'autre étant virtuellement court-circuité par le thyatron conducteur. Évidemment, le taux de croissance de la tension n'est pas exactement égal à la valeur moyenne pour les premiers 200 V, mais du fait que  $v_i$  est en général grand, on obtient une approximation suffisamment bonne. Par conséquent :

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{v_i R}{2 \cdot L_s} \dots\dots\dots (13)$$

### 8.91. Facteur de commutation (calcul).

On obtient son expression, en multipliant les équations (7) et (13) l'une par l'autre :

$$\frac{di_a}{dt} \cdot \frac{dv_i}{dt} = \frac{v_i^2 \cdot R}{4 L_s^2} \dots\dots\dots (14)$$

Le résultat se lit [(ampère × volt) par microseconde<sup>2</sup>]. On peut donc l'écrire sous la forme :

Facteur de commutation :  $K = \frac{v_i^2 \cdot R}{4 L_s^2} \times 10^{-12} \dots (15)$

Or, pour l'amortissement critique :

$$R^2 = 8L_s/C \dots\dots\dots (16)$$

d'où en substituant la valeur de  $R$ , ainsi déterminée, dans l'équation (15), nous obtenons :

$$C \times K^2 = \frac{v_i^4}{2 L_s^3} \times 10^{-24} \dots\dots\dots (17)$$

Si l'on utilise les unités électriques pratiques, on écrira  $C$  en  $\mu F$  et  $L$  en  $mH$ , au lieu de farad et henry, respectivement. Avec ces unités pratiques, l'équation devient :

$$C \times K^2 = \frac{v_i^4}{2 \cdot L_s^3} \times 10^{-9} \dots\dots\dots (18)$$

De même les équations (15) et (16) deviennent respectivement :

$$K = \frac{v_i^2 \cdot R}{4 L_s^2} \times 10^{-6} \dots\dots\dots (19)$$

et :

$$R^2 = \frac{8 \cdot L_s}{C} \times 10^8 \dots\dots\dots (20)$$

D'après les équations (18) et (19), on peut établir les deux équations qui avaient été extraites précédemment de la référence (1) et qui ont été données plus haut.

### 8.92. Applications pratiques.

Avant de discuter le mode d'application pratique des équations (18) et (19), il convient de définir la grandeur  $L_s$ . Cette grandeur est la réactance qui s'oppose à l'échange normal de courant entre deux redresseurs qui deviennent successivement conducteurs. L'inductance de fuite équivalente par phase du transformateur reportée au secondaire, est celle qui est mesurée aux bornes d'un bobinage secondaire, lorsque tous les autres bobinages secondaires sont ouverts et que le bobinage primaire est court-circuité. Cette mesure doit être faite de préférence à l'aide d'un courant approximativement égal à celui qui existe en fonctionnement normal.

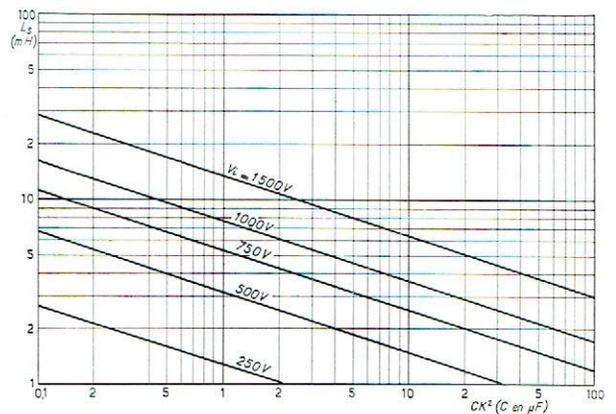


Fig. 101

### 8.93. Utilisation des équations et des graphiques.

Le graphique de la figure 101 a été tracé d'après

l'équation (18). Il représente l'inductance de fuite par phase  $L_s$  en fonction du produit  $CK^2$ . On utilise, comme paramètre, la tension inverse initiale  $v_i$ . Pour des valeurs connues de  $L_s$ ,  $K$  et  $v_i$ , la valeur de  $C$  peut être obtenue par lecture presque directe. Cette valeur, toutefois, sera la valeur minimale et il faut encore tenir compte des tolérances sur les valeurs des pièces. La valeur de la résistance peut alors être obtenue en portant la valeur de  $C$  dans l'équation (18). Si, par exemple, on a  $L_s = 5 \text{ mH}$ ,  $v_i = 1\,000 \text{ V}$  et

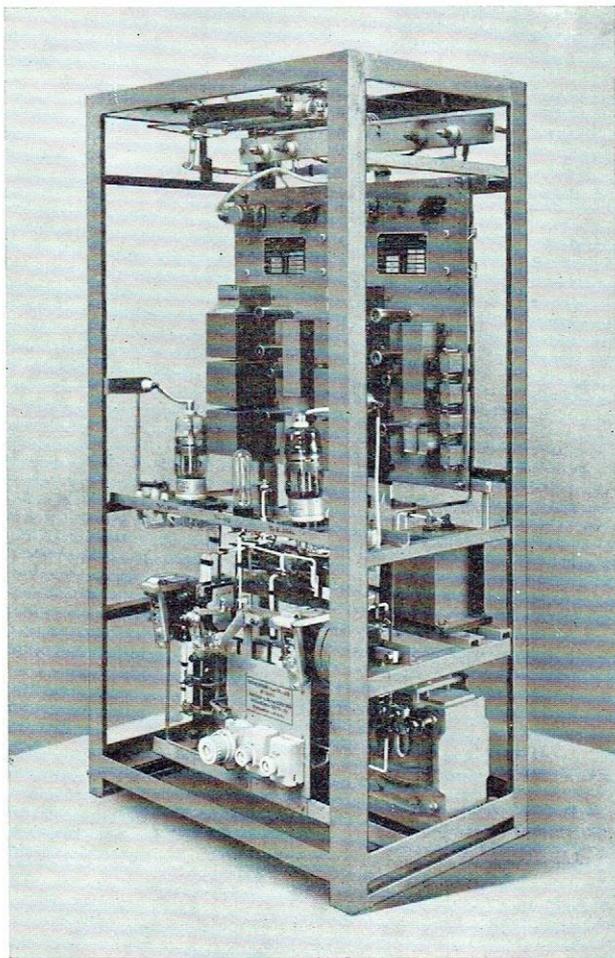


Fig. 102. — Stabilisateur de tension alternative 6 kVA pour réseau à 50 Hz, équipé de thyatron PL 5545. Alimentation des équipements relais C.S.F. de télévision. Réalisation ELMAG-Paris. Cliché Mourette et Cie.

$K = 100$ , on voit d'après le graphique que  $CK^2 = 4,0$ . Par conséquent,  $C = 0,0004 \mu\text{F}$ .

$$R = \sqrt{\frac{8 \cdot L_s}{C} \times 10^3} = \sqrt{\frac{8 \times 5 \times 10^3}{4 \times 10^{-4}}} = 10 \text{ k} \Omega$$

Si l'on désire rendre la valeur de  $K$  dix fois plus faible, les valeurs deviennent  $C = 0,04 \mu\text{F}$ ,  $R = 1\,000 \Omega$ . Ce résultat aurait pu être obtenu immédiatement en remarquant que  $C$  varie comme  $1/K^2$ . Il convient de remarquer que  $C$  varie aussi comme la quatrième puissance de la tension inverse initiale. Le graphique que l'on vient de présenter ne supprime pas la nécessité des mesures pratiques à l'oscillographe, mais il permet de réduire le temps exigé par la détermination ou par la recherche d'un facteur de commutation donné.

#### 8.94. Limitations des circuits amortisseurs.

L'addition d'un circuit amortisseur aux bornes d'un thyatron augmente les pertes électriques du montage. Il y a donc une valeur supérieure à ne pas dépasser pour les différentes valeurs des pièces employées et il existe également une limitation fixée par les spécifications du tube, par exemple celle du courant anodique de crête. En effet, après un amorçage temporisé, la capacité se décharge à travers la résistance d'amortissement dans le thyatron et les courants temporaires au début de la conduction seront donc de forme exponentielle. Les courants à la fin de la période de conduction sont ceux d'un circuit à l'amortissement critique. Les pertes, dans la résistance supplémentaire, comprennent donc une perte en régime établi et une perte transitoire répétée. C'est cette dernière qui apporte en général la contribution la plus large aux pertes totales dans la résistance d'appoint. La valeur de ces pertes dues aux courants temporaires dépendent de la nature du redresseur, de la puissance d'alimentation, des tensions de crête, etc., et l'on ne saurait en donner une expression générale, mais on peut en faire l'évaluation grâce à des séries de relevés oscillographiques.

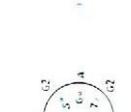
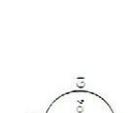
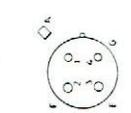
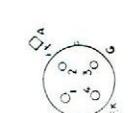
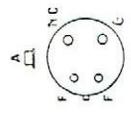
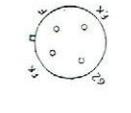
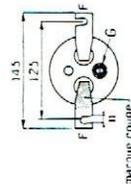
#### BIBLIOGRAPHIE

1. Marshall, Schakelford. Commutation factor in thyatron circuit design. Electronics. 27, p. 198. March 1954 (N° 3).
2. Overbeck. Critical inductance and control rectifiers. Proc. of the I.R.E. 27, p. 655. October 1939.

# THYRATRONS INDUSTRIELS POUR COURANTS FORTS

TYPES	Courant anodique (ampères) (1)	Chauffage à $\pm 5\%$	Temps de préchauff. minimal (secondes)	Tension anodique crête max (volts)	Commande de grille	Temps d'ionisation approx. ( $\mu s$ )	Temps de désionisation approx. ( $\mu s$ )	Dimensions approx. en mm	Support	Culot
<b>PL 3G23</b> Triode à gaz rare et vapeur de mercure	moyen max : 1,6 de crête : 6,4	Vf = 2,5 V If = 7 A	15	Va dir 1 500 Va inv 1 500 V arc 12	négative	10	1 000	H = 155 $\varnothing$ = 52	américain 4 broches	5
<b>PL 105</b> Tétrade à vapeur de mercure	moyen max : 6,4 de crête : 40	Vf = 5 V If = 10 A	300	Va dir 2 500 Va inv 2 500 V arc 16	mixte	10	1 000	H = 286 $\varnothing$ = 97	Super Jumbo N° 40403 Clip 40 620	8
<b>PL 150</b> Triode à vapeur de mercure	moyen max : 15 de crête : 90	Vf = 1,92 V If = 26 A	60	Va dir 240 Va inv 500 V arc 12	mixte	10	1 000	H = 291 $\varnothing$ = 92	Fixation par pattes	9
<b>PL 255</b> Triode à vapeur de mercure	moyen max : 12,5 de crête : 80	Vf = 5 V If = 16 A	300	Va dir 1 500 Va inv 2 500 V arc 12	mixte	10	1 000	H = 334 $\varnothing$ = 102	Fixation par pattes	9
<b>PL 260</b> Triode à vapeur de mercure	moyen max : 25 de crête : 160	Vf = 5 V If = 27,5 A	600	Va dir 1 500 Va inv 2 500 V arc 12	mixte	10	1 000	H = 395 $\varnothing$ = 127	Fixation par pattes	9
<b>PL 1607</b> Pentode à gaz rare	moyen max : 0,5 de crête : 2	Vf = 2 V If = 2,6 A	60	Va dir 700 Va inv 700 V arc 15	négative	—	500	H = 142 $\varnothing$ = 48	Européen 5 broches	4
<b>PL 5544</b> Triode à gaz rare	moyen max : 3,2 de crête : 40	Vf = 2,5 V If = 12 A	60	Va dir 1 500 Va inv 1 500 V arc 16	négative	10	400	H = 190 $\varnothing$ = 67	Super Jumbo (N° 40 403)	7
<b>PL 5545</b> Triode à gaz rare	moyen max : 6,4 de crête : 80	Vf = 2,5 V If = 21 A	60	Va dir 1 500 Va inv 1 500 V arc 16	négative	50	500	H = 229 $\varnothing$ = 67	Super Jumbo (N° 40 403)	7
<b>PL 5557 PL 17</b> Triode à vapeur de mercure	moyen max : 0,5 de crête : 2	Vf = 2,5 V If = 5 A	5	Va dir 2 500 Va inv 5 000 V arc 16	négative	10	1 000	H = 169 $\varnothing$ = 62	Américain 4 broches	5
<b>PL 5559 PL 57</b> Triode à vapeur de mercure	moyen max : 2,5 de crête : 15	Vf = 5 V If = 4,5 A	300	Va dir 1 000 Va inv 1 500 V arc 16	négative	10	1 000	H = 185 $\varnothing$ = 62	Américain 4 broches	6
<b>PL 5684</b> Triode à gaz rare	moyen max : 2,5 de crête : 30	Vf = 2,5 V If = 8,5 A	30	Va dir 1 000 Va inv 1 250 V arc 10	négative	10	1 000	H = 150 $\varnothing$ = 40	Américain 4 broches	5
<b>PL 5727 ou 2 D 21</b> Tétrade à gaz rare	moyen max : 0,1 de crête : 0,5	Vf = 6,3 V If = 0,6 A	10	Va dir 650 Va inv 1 300 V arc 8	négative	0,5	35	H = 54 $\varnothing$ = 19	Miniature 7 broches	3

(1) Le temps d'intégration du courant moyen est de 15 s., sauf pour les types PL 3G23 et PL 5684 (5 s.).



Culot 9

Culot 8

Culot 7

Culot 6

Culot 5

Culot 4

Culot 3