

Rapport C.E.A. n° 163

Service des Constructions Electriques

ALIMENTATIONS REGULEES POUR SEPARATEUR D'ISOTOPES

A. LAVAITTE et J. POTTIER

octobre 1953

INTRODUCTION.

Cet équipement est destiné à équiper le séparateur d'isotopes qui fait l'objet du rapport C.E.A. n° 158.

Il comprend :

- une alimentation régulée en tension
- une alimentation régulée en courant.

Le spectre de fluctuations de ces ensembles est différent dans les deux cas.

POUR LA REGULATION DE TENSION.

Il peut y avoir de très grandes et très brusques fluctuations du faisceau ionique, ce qui nous contraint à employer des organes de commande rapides (tubes à vide).

POUR LA REGULATION D'INTENSITE.

Le courant à réguler alimente un électroaimant. Les fluctuations seront donc lentes, les variations rapides étant absorbées par la self de l'électroaimant.

Il est donc parfaitement inutile dans ce cas d'utiliser des tubes à vide. Nous employons une génératrice tournante car son inertie augmente la stabilité et les harmoniques de commutation sont étouffés par la self du circuit d'utilisation.

SOURCE DL HAUTE-TENSION REGULEE.

SPECIFICATIONS.

Elle doit fournir une haute-tension réglable de 10 à 50 kV, stable à 0,5/1000 près, destinée à alimenter les électrodes du séparateur d'isotopes.

Les causes de fluctuations sont les suivantes :

- 1°) les variations d'intensité du courant ionique (de 1,5 à 50 mA): seules les composantes de fréquences basses du spectre de fluctuation (fréquences inférieures à 10 c/s) peuvent prendre une amplitude notable et doivent être compensées par la régulation ;
- 2°) les variations de tension du secteur : d'après des enregistrements, nous avons admis qu'elles restaient inférieures à 10% de la tension minimum ;
- 3°) le ronflement résiduel, après filtrage de la tension redressée (inférieur à 1% de celle-ci).

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.

Il résulte de ces données que l'on doit contrôler une puissance totale de 2 kW.

D'autre part, le spectre des fluctuations s'étend relativement haut, ce qui nous conduit soit à intercaler des filtres passe-bas, soit à effectuer la régulation à l'aide de tubes à vide.

Il serait très coûteux d'établir des filtres assez efficaces dans ce cas, avec des tensions de sortie atteignant 50 kV. (C'est d'ailleurs pourquoi il subsiste 1% de ronflement à la sortie de l'alimentation non régulée).

La régulation de puissances de l'ordre de 2 kW sous des tensions variables de 10 à 50 kV conduirait à l'utilisation de tubes spéciaux ou à des montages faisant appel à plusieurs tubes en série, si l'on remarquait qu'en

fait on travaille au cours de tout une manipulation sous une différence de potentiel U constante.

Ce n'est qu'au cours de réglages qu'on est amené à faire varier U , et on peut ajuster alors manuellement l'appareillage, ce qui correspond en somme à une première chaîne de régulation très lente.

En fait la d.d.p. aux bornes de l'alimentation est réglée approximativement à la valeur U désirée à l'aide d'un alternostat à commande manuelle, la lampe n'ayant qu'à réduire les variations autour de la valeur U dues aux fluctuations du courant ionique et du secteur.

On utilise fréquemment pour construire de telles régulations le dispositif représenté par la figure 1, appelé régulation parallèle car l'élément de contrôle est en parallèle sur la charge.

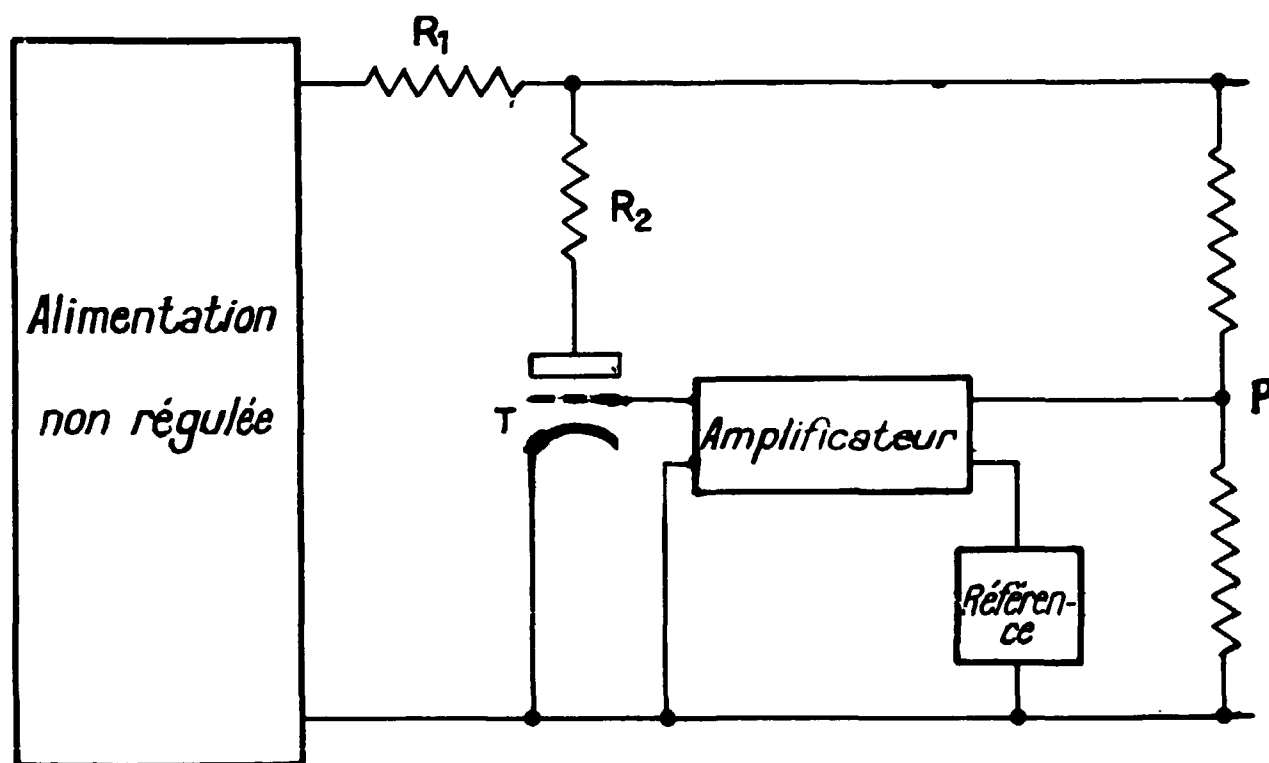


Figure 1.

La tension d'utilisation est prélevée aux bornes d'un potentiomètre dont une des branches, fixe, est constituée par la somme de la résistance interne R_1 de l'alimentation et de la résistance R_1 , l'autre branche, variable, constituée par R_2 et le tube de contrôle T.

Ce dernier est commandé (après amplification), par la tension d'erreur qui est la différence entre une tension de référence et une partie de la tension d'utilisation prélevée par le potentiomètre P.

Ce montage présenterait cependant dans notre cas des inconvénients graves par rapport aux montages dans lesquels le tube T est monté en série avec la charge.

On serait en effet conduit à utiliser une lampe plus puissante que dans ce dernier cas et à admettre un très mauvais rendement moyen, comme nous allons le montrer brièvement.

Reportons nous à la figure 1, en adoptant les notations suivantes :

E : la force électromotrice de la source haute tension ;

E_{\min} : la valeur minimum de cette force électromotrice ;

$E_{\max} = 1,1 E_{\min}$: sa valeur maximum (on suppose que la haute tension peut fluctuer de 10%) ;

R_1 : la résistance interne de la source. Elle est égale à 50 k Ω ;

$i_{\min} = 1,5 \text{ mA}$ l'intensité minimum d'utilisation ;

$i_{\max} = 50 \text{ mA}$ " " maximum " ;

i'_1 et i'_2 intensité du courant traversant la branche R_2 , T pour i_{\max} et i_{\min} respectivement.

Plaçons nous dans des conditions extrêmes de fonctionnement.

La tension d'utilisation est alors $U = 50 \text{ kV}$ et nous avons ;

$$\text{pour } E_{\min}, i_{\max} \quad E_{\min} - (R_i + R_1) (i_{\max} + i_1') = 50 \text{ kV} \quad (1)$$

$$\text{pour } E_{\max}, i_{\min} \quad E_{\max} - (R_i + R_1) (i_{\min} + i_2') = 50 \text{ kV} \quad (2)$$

Soit en retranchant les deux équations (1), et (2)

$$0,1 E_{\min} - (R_i + R_1) (i_{\min} - i_{\max} + i_2' - i_1') = 0$$

d'où

$$\frac{i_2' - i_1'}{2} = \frac{0,1 E_{\min}}{R_i + R_1} - (i_{\min} - i_{\max}) \quad (3)$$

Voyons où nous serions conduits si nous voulions utiliser une 450 T.H. Cette lampe admet une tension maximum entre plaque et cathode de 6 kV, elle possède un coefficient d'amplification égal à 38 et son anode peut dissiper 450 W.

Entre les électrodes de la lampe existe une tension

$$V_1 = E_{\min} - R_2 i_1' \quad \text{pour } i_{\max}, \quad \text{avec } V_1 < 6 \text{ kV (tension maximum donnée par le constructeur)}$$

$$R_2 i_1' = E_{\min} - V_1 \quad (4)$$

D'autre part, il faut

$$R_2 i_2' < E_{\max} \quad \text{pour } i_{\min} \quad (5)$$

Par suite en divisant membre à membre les expressions (4) et (5) on obtient

$$\frac{i_1'}{i_2'} > \frac{E_{\min} - V_1}{E_{\max}}$$

C'est-à-dire

$$i_2' < \frac{E_{\max}}{E_{\min} - V_1} i_1'$$

Soit

$$i_2' - i_1' < \left(\frac{E_{\max}}{E_{\min} - V_1} \right) i_1'$$

En première approximation on peut prendre $E_{\min} = E_{\max} = 50 \text{ kV}$.

On obtient

$$i_2' - i_1' < \frac{6}{44} i_1'$$

En portant dans l'équation (3) il vient

$$\frac{6}{44} i_1' > \frac{0,1 E_{\min}}{50.000 + R_1} + 0,0485$$

soit, en négligeant

$$\frac{0,1 E_{\min}}{50.000 + R_1}$$

$$i_1' > 350 \text{ mA.}$$

Ce qui montre qu'à l'intensité minimum d'utilisation (1,5 mA) il devra passer dans la lampe de régulation à 50 kV, un courant d'environ 350 mA.

Ceci nécessite une alimentation de 20 kW et une lampe de puissance d'environ 2 kW, condition contradictoire avec l'emploi d'une 450 T.H.

Le système de régulation avec une lampe à vide en parallèle sur l'impédance de charge est donc d'un très mauvais rendement quand la puissance à réguler devient un peu importante. Ceci nous a conduits à le rejeter.

Nous avons donc utilisé le système de régulation série (fig.2).

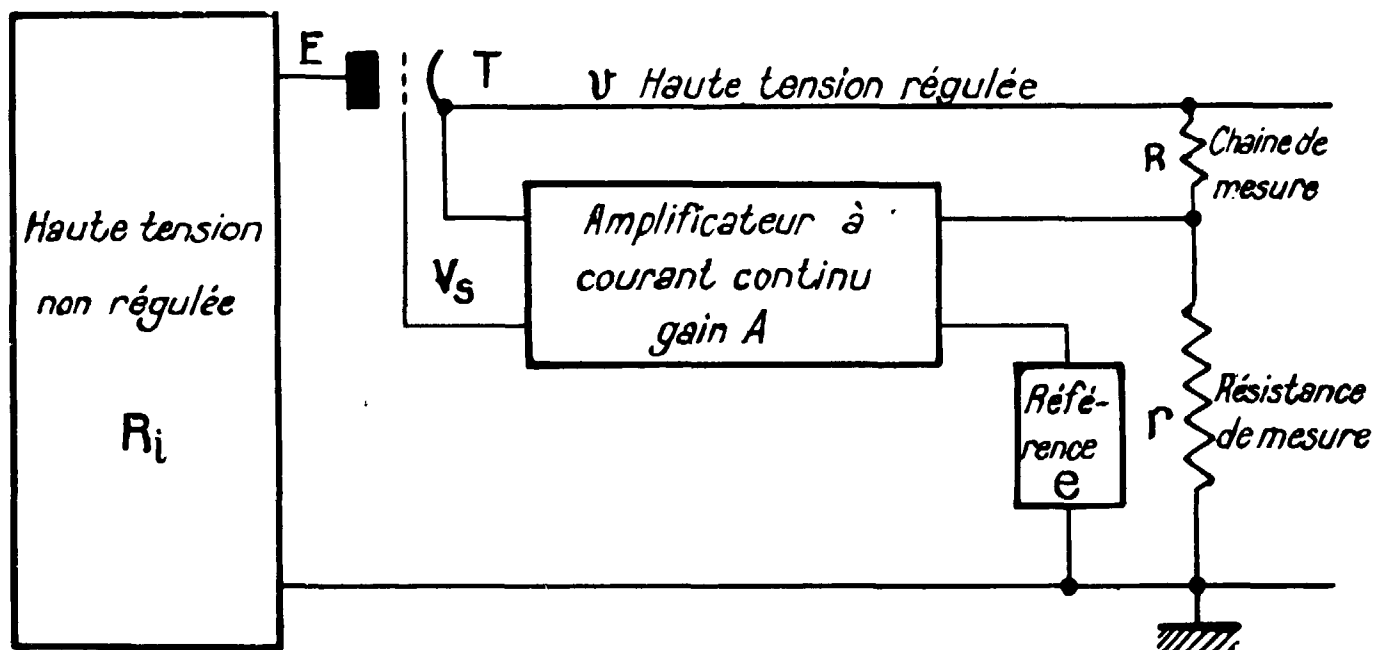


Figure 2

La tension d'erreur à l'entrée de l'amplificateur est, à tout moment, la différence entre la tension de référence et la tension qui prend naissance aux bornes de la résistance de mesure.

En agissant sur la polarisation d'une lampe montée en résistance variable, en série dans le circuit d'utilisation, on régule la tension de sortie, en maintenant constamment la tension d'erreur voisine de zéro.

Un tel système présente l'inconvénient de porter les électrodes de la lampe à des potentiels voisins de celui de la haute tension.

Son avantage réside dans le fait que le rendement est très bon, comme va le montrer un rapide calcul.

Reportons nous à la figure 2 en prenant les mêmes notations que précédemment.

Plaçons nous dans les conditions extrêmes de fonctionnement, la tension d'utilisation étant alors 50 kV.

1er cas : E_{\min}, i_{\max}

La tension V_1 aux bornes de la 450 T.H. est presque nulle.

2ème cas : E_{\max}, i_{\min}

La tension V_1 aux bornes de la 450 T.H. est maximum (6 kV).

On en tire les équations

$$E_{\min} - R_i i_{\max} = U \quad (1)$$

$$E - R_i i - V_1 = U \quad (2)$$

$$\text{avec } \begin{cases} E_{\min} < E < E_{\max} \\ i_{\min} < i < i_{\max} \\ 0 < V_1 < 6 \text{ kV} \end{cases}$$

On obtient en combinant les équations (1) et (2)

$$\begin{aligned} V_1 &= E - U - R_i i \\ &= E - E_{\min} + R_i i_{\max} - R_i i \quad \text{on peut écrire } E - E_{\min} = k E_{\min} \end{aligned}$$

$$V_1 = kE_{\min} + R_i i_{\max} - R_i i \quad (3)$$

Portons la valeur de E_{\min} tirée de l'équation (1) dans l'équation (3). Il vient

$$V_1 = kU + (k + 1) R_i i_{\max} - R_i i$$

La lampe consomme une puissance

$$P = i V_1 = [kU + (k + 1) R_i i_{\max} - R_i i] i$$

$$\frac{dP}{di} = U + (k + 1) R_i i_{\max} - 2R_i i$$

$$\frac{dP}{di} = 0 \quad \text{pour } i = \frac{U + (k + 1) R_i i_{\max}}{2R_i}$$

Dans les conditions les plus défavorables $k = 0,1$ puisque E peut varier de E_{\min} à $E_{\max} = 1,1 E_{\min}$.

Par suite, on dissiperait dans la lampe la puissance maximum pour

$$i \approx 78 \text{ mA.}$$

Cette intensité n'étant jamais atteinte, la puissance dissipée dans la lampe atteindra son maximum pour $i_{\max} = 50 \text{ mA}$.

Un éclateur limite la tension plaque cathode de la 450 T.H. à 6 kV, la puissance dissipée dans la lampe ne pourra donc excéder 300 W.

Par conséquent, la lampe 450 T.H. qui admet 450 W de dissipation d'anode convient parfaitement.

Ce système de régulation est très intéressant ; nous l'avons adopté en nous référant à une réalisation antérieure [1].

MONTAGE.

D'après la figure 2, on s'aperçoit que l'entrée et la sortie de l'amplificateur doivent être indépendantes. D'autre part, la tension d'utilisation doit être positive par rapport à la masse.

Nous sommes donc conduits aux montages suivants, pour que l'entrée et la sortie de l'amplificateur soient à des potentiels voisins non indépendants.

[1] R. PEPINSKY and P. JARMOTZ An inductively coupled series tube D.C. High voltage regulator.

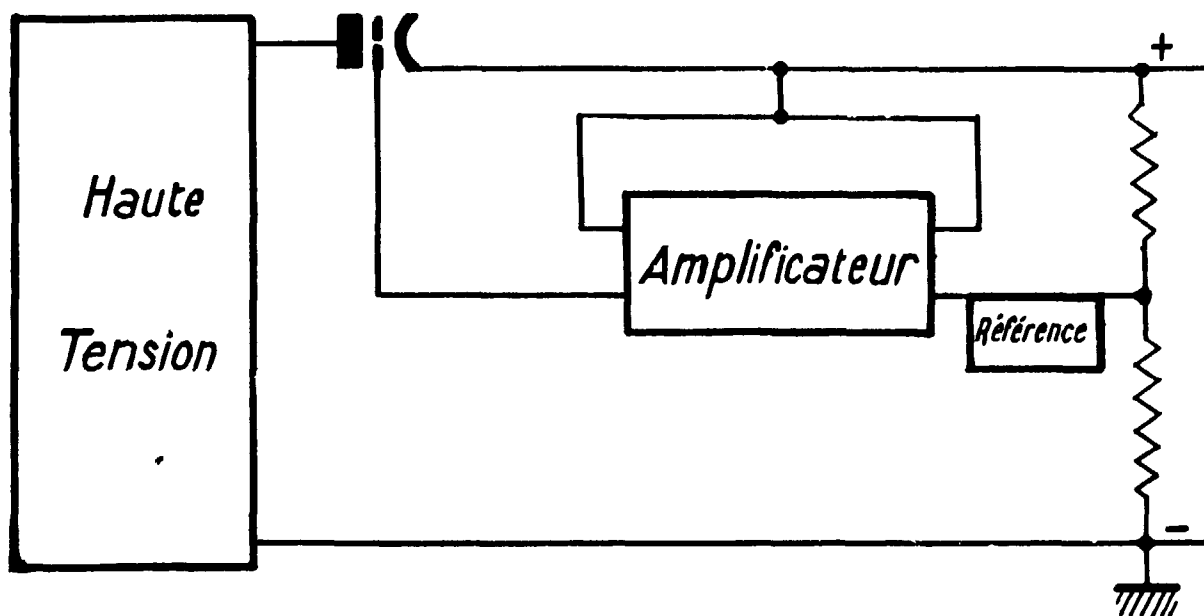
1er cas.

Figure 3

Dans ce cas, tout l'appareillage est au potentiel de la haute tension ;

Avantages : l'entrée et la sortie de l'amplificateur ne sont pas indépendantes. La haute tension a un point directement à la masse.

Inconvénients : ce montage nécessite un coûteux isolement de tout l'appareillage à 50 kV.

Les commandes manuelles doivent être isolées.

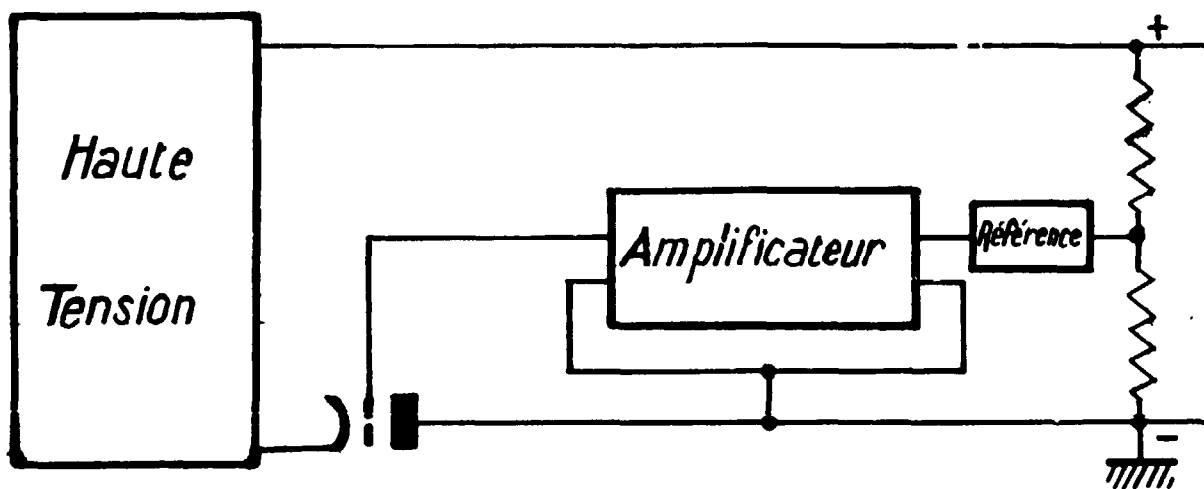
2ème cas.

Figure 4.

Avantages : l'appareillage est au potentiel de la masse.

Inconvénients : la haute tension n'a pas de point directement à la masse.

La tension de commande de la lampe de régulation étant appliquée entre grille et anode, l'amplificateur de commande doit fournir une tension de sortie élevée (plusieurs kV).

Ce montage conviendrait pour une haute tension négative par rapport à la masse (figure 5).

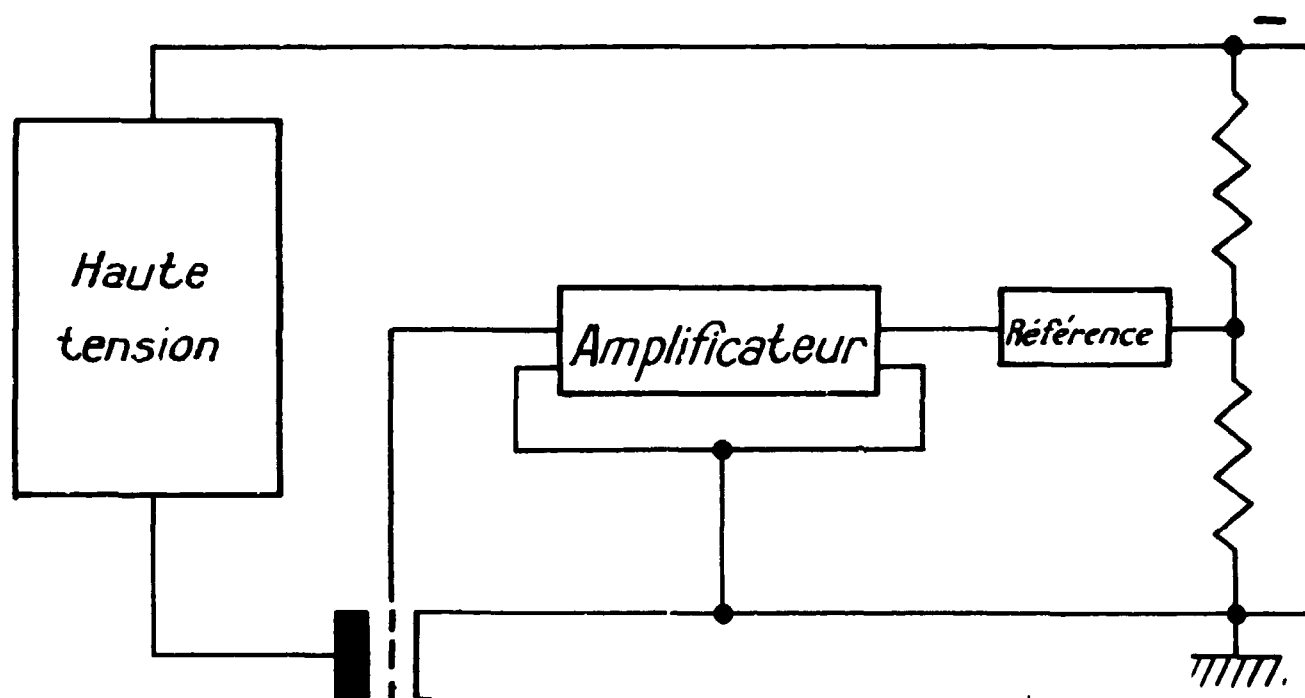


Figure 5

On tourne ces difficultés en transmettant à l'aide d'un courant porteur de haute fréquence modulé le signal d'erreur amplifié.

De ce fait, on rend l'entrée et la sortie de l'amplificateur indépendantes, tout en permettant de transmettre les fréquences très basses et la composante continue du signal. C'est un montage de ce type que nous avons adopté.

Le schéma général de l'appareillage est représenté par la figure 6, page suivante.

FONCTIONNEMENT.

La haute tension est fournie par deux kénotrons travaillant en doubleur de tension alimenté par un transformateur. La haute tension désirée est obtenue grâce à l'alternostat inséré dans le primaire de ce transformateur. Elle est appliquée à la plaque de la 450 T.H. montée en série.

Un diviseur de tension (40 M Ω - 400 k Ω) monté entre cathode et masse sert à prélever une fraction déterminée de la haute tension (1/100).

La tension prélevée prise aux bornes de la résistance de 400 k Ω est opposée à une tension de référence (0 à 500 V). La tension d'erreur ainsi obtenue est amplifiée par un amplificateur à courant continu monté en push-pull.

La tension délivrée par l'amplificateur sert à moduler l'oscillateur haute fréquence. Le primaire du transformateur accordé sur la fréquence de résonance du secondaire forme le circuit oscillant.

La tension haute fréquence recueillie sur le secondaire redressée et filtrée commande la lampe.

DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE.

Il comprend :

- I. LA SOURCE HAUTE TENSION constituée d'un transformateur haute-tension, d'un redresseur monté en doubleur de tension et d'un filtre passe-bas. Elle est commandée par un transformateur à curseur.

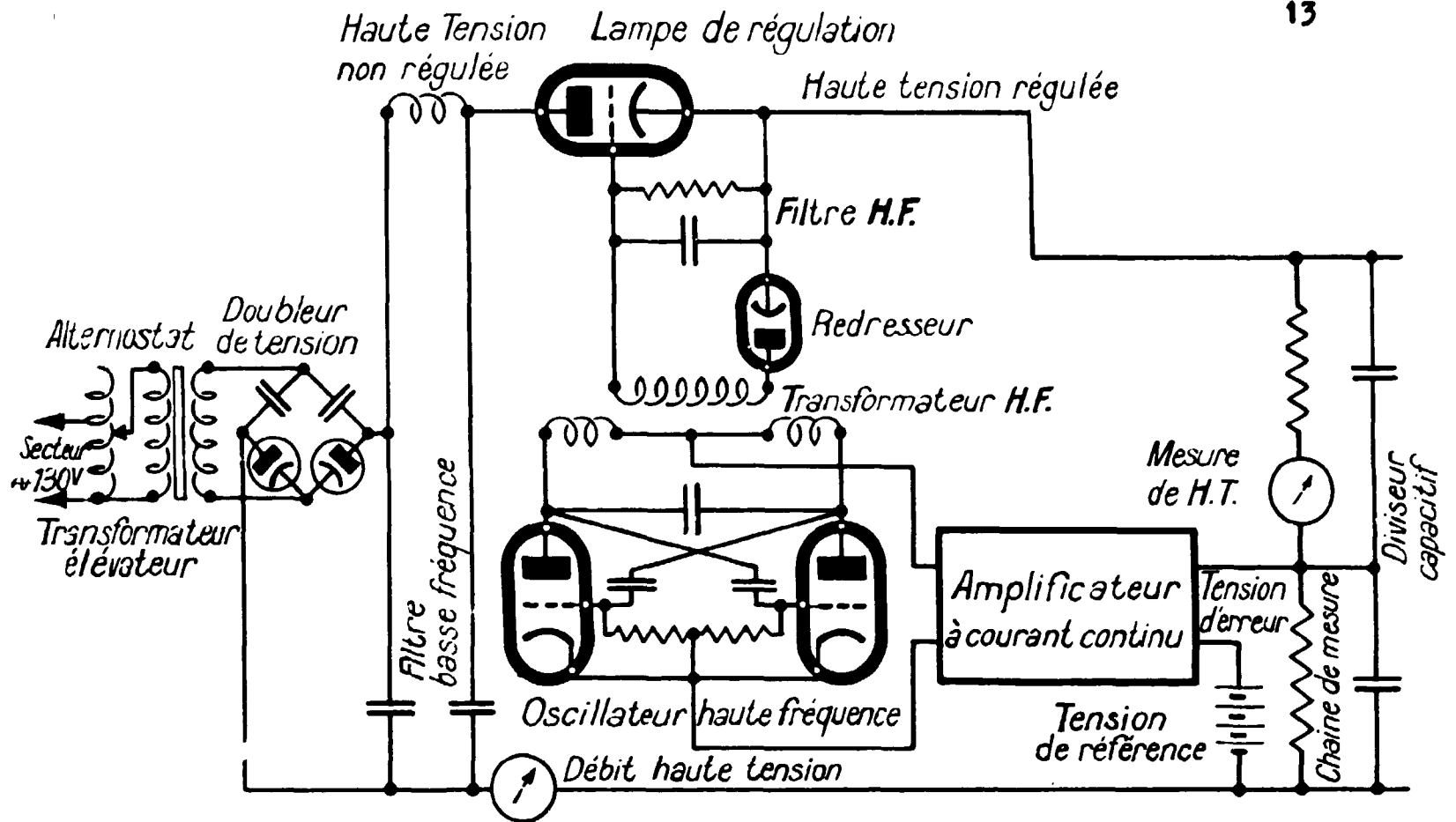


fig. 6

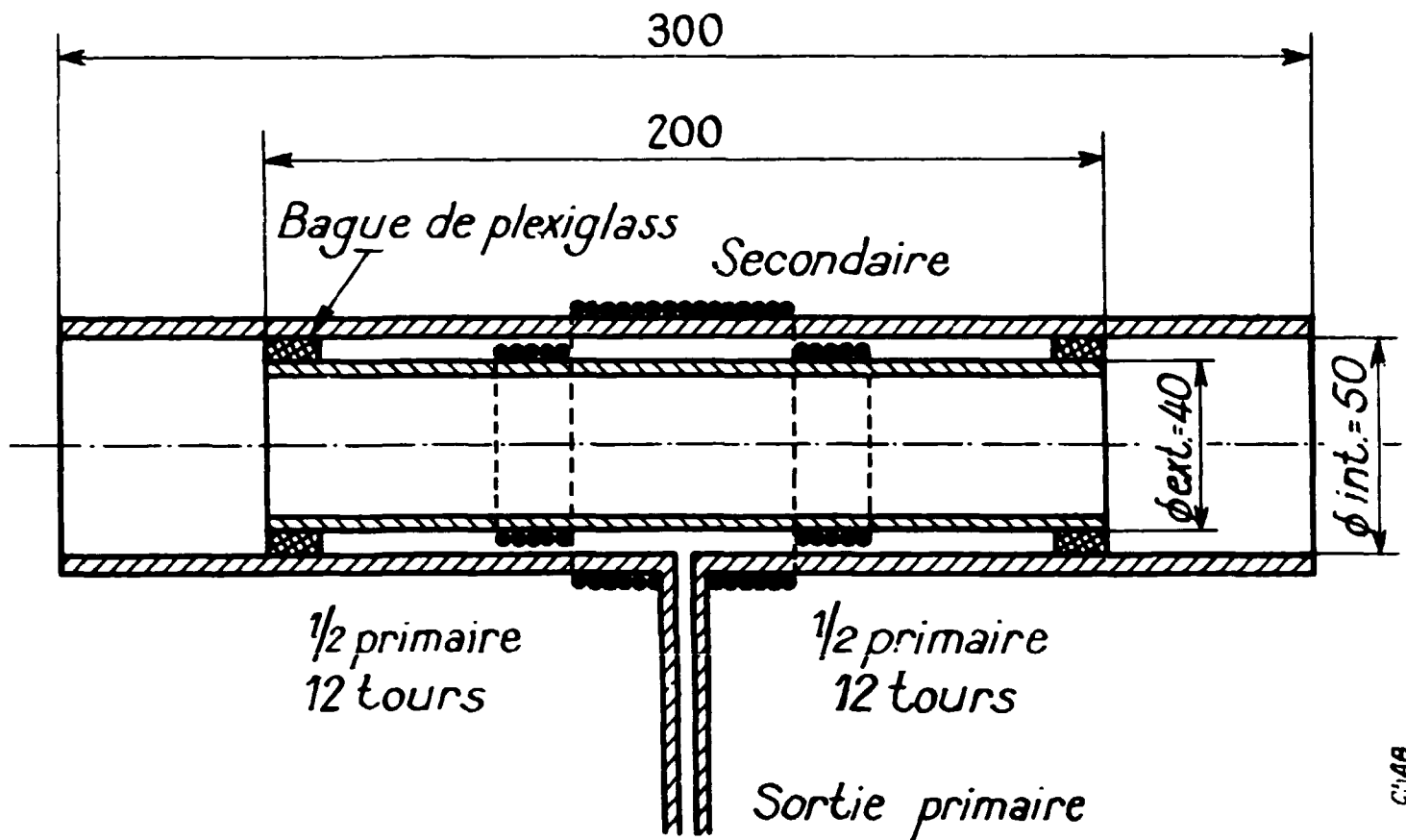


fig. 7

II. LE CIRCUIT DE COMMANDE DE LA LAMPE 450 T.H.
LE TRANSFORMATEUR HAUTE-FREQUENCE.

Il est constitué par deux tubes de verre concentriques : sur le tube extérieur sont enroulés les 40 tours du secondaire, sur le tube intérieur sont bobinés les deux demi primaires de 12 tours chacun.

L'encombrement de ce transformateur est donné par la figure 7 (page 13). Un tube de verre d'une longueur de 1 m soudé sur le tube extérieur, sert à la sortie des fils du primaire.

CIRCUIT REDRESSEUR ET FILTRE HAUTE FREQUENCE.

L'oscillateur est symétrique, il est accordé sur la fréquence de résonance du secondaire.

La fréquence d'oscillation est d'environ 2,4 MHz.

La 450 T.H. est chauffée par un transformateur 110 V - 130 V - 7,5 V - 12 A isolé entre primaire et secondaire à 50 kV.

L'isolateur haute-tension de ce transformateur sert de support pour l'appareillage qui est à la haute tension ; c'est-à-dire : le transformateur haute fréquence, la 6H6 redresseuse, le circuit de filtre (2 selfs 3 mH, 2 condensateurs 50 pF), le transformateur 7,5 V - 6,3 V de chauffage de la 6H6, le support de la 450 T.H. et l'éclateur entre plaque et cathode.

Le schéma de la partie à la très haute tension est représenté figure 8, page suivante.

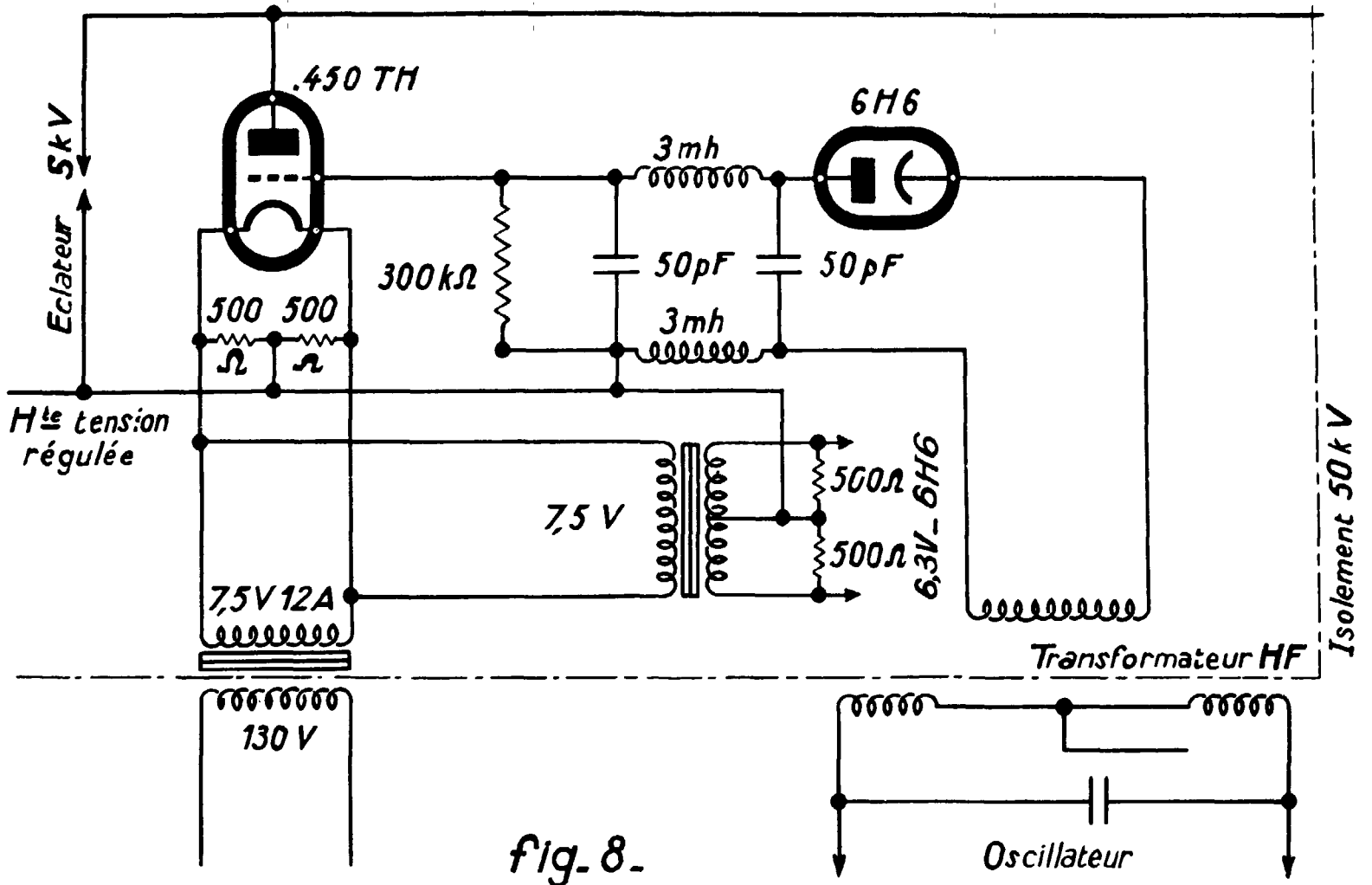


fig. 8.

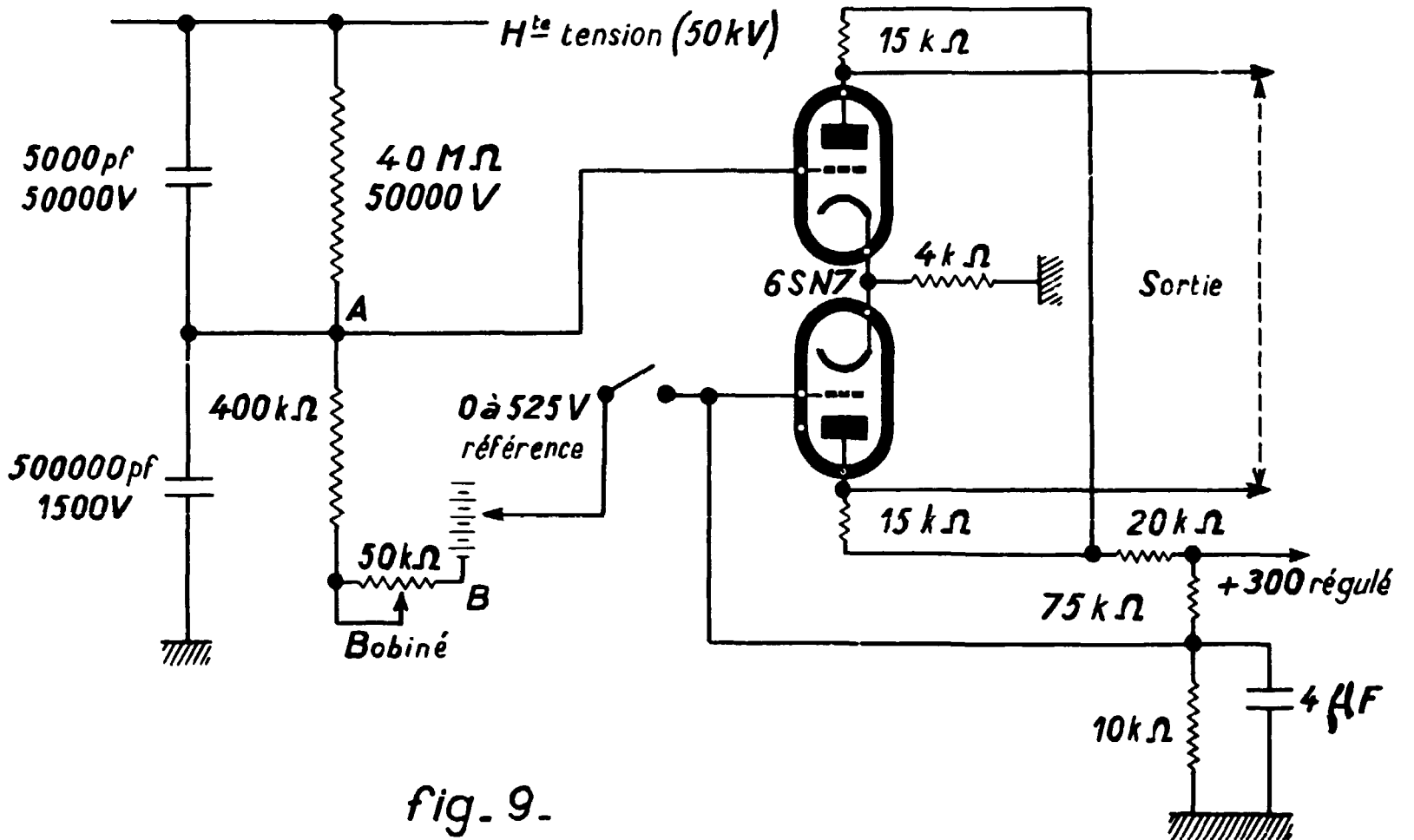


fig. 9.

III. AMPLIFICATEUR A COURANT CONTINU (figure 9, page 15).

On utilise un amplificateur symétrique pour réduire les effets des variations de chauffage et de la haute tension.

Le circuit est monté en contre-réaction de façon à maintenir un potentiel constant et fixé à l'avance entre les points A et B.

Si la tension de référence est augmentée, le courant dans la résistance de $400 \text{ k}\Omega$ produisant la tension de comparaison devra augmenter jusqu'à ce que la différence entre ces deux tensions soit revenue à l'équilibre, c'est-à-dire voisine de zéro.

En définitive, il faudra donc que la très haute tension augmente dans le rapport $40 \text{ M}\Omega / 400 \text{ k}\Omega = 100$.

Le point de fonctionnement du tube étant au milieu de la zone de régulation (c'est-à-dire quand il y a $2,5 \text{ kV}$ entre plaque et cathode), les variations de la haute tension qui n'excéderont pas $2,5 \text{ kV}$ en plus ou moins seront régulées par la chute de tension plaque cathode et ainsi le potentiel de la cathode restera constant par rapport à la masse.

L'amplificateur comprend deux étages successifs de 6SN7 montés symétriquement. Le dernier étage commande une 6AC7 qui module en amplitude un oscillateur haute fréquence symétrique constitué par une 6SN7.

Deux alimentations de tension sont prévues :

- la première est régulée. Elle peut fournir 130 mA sous 300 V et alimenter l'amplificateur continu. La tension de référence est donnée par un tube à gaz (VR 75). La régulation s'effectue par contre-réaction en utilisant un amplificateur à courant continu équipé de 2 6SL7. Quatre 6Y6 en parallèle sont montées en série dans le circuit d'utilisation et commandées par les deux 6SL7.

- la seconde peut fournir 300 V - 30 mA. Elle est réglée par deux tubes à gaz (VR 150) montés en série et elle alimente l'oscillateur haute fréquence.

Cette alimentation est isolée de la masse à cause de la nécessité de couplage continu pour la 6AC7 de l'amplificateur. Le schéma est représenté planche 1.

IV. CHAÎNE DE MESURE ET TENSION DE RÉFÉRENCE.

La chaîne de mesure comporte deux résistances en série :

- une de 40 M Ω . Elle est constituée par l'assemblage de 80 résistances de 500 k Ω , 2 W DACO en série, isolées sous tube de verre;
- une de 400 k Ω . C'est aussi une résistance DACO 400 k Ω - 2 W. C'est aux bornes de cette résistance que l'on recueille la tension que l'on compare à la force électromotrice de référence.

TENSION DE RÉFÉRENCE (figure 10, page 18)

On désire une tension variable de 0 à 525 V. La tension de référence est constituée par deux chaînes successives de tubes à gaz.

Le ronflement résiduel est de l'ordre de 10 μ V pour 525 V de sortie. La tension d'alimentation du secteur peut varier entre 95 V et 150 V.

CALCUL DU GAIN DU SYSTÈME.

A) Régulation statique.

En nous reportant à la figure 2, page 7, nous avons successivement :

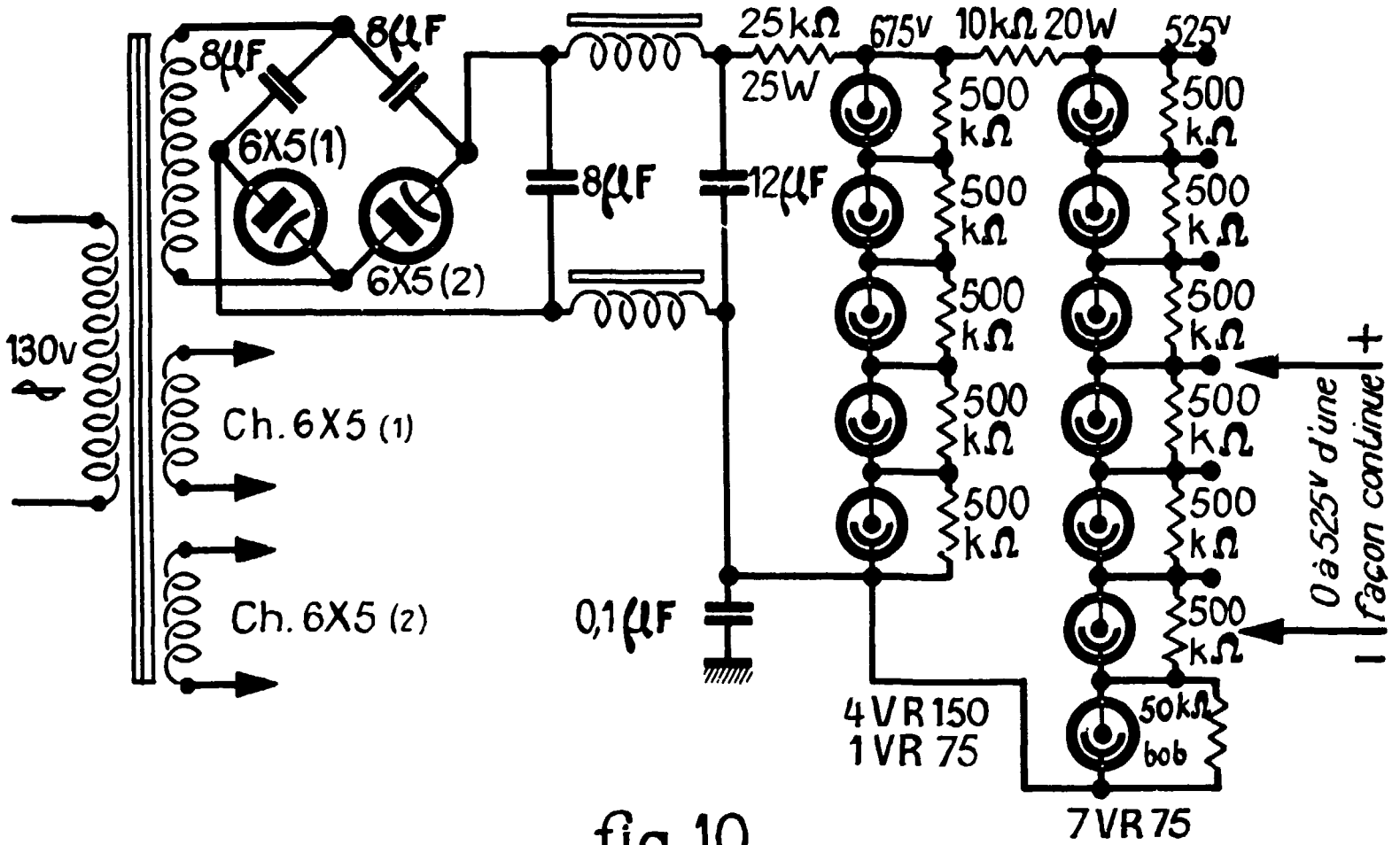


fig.10

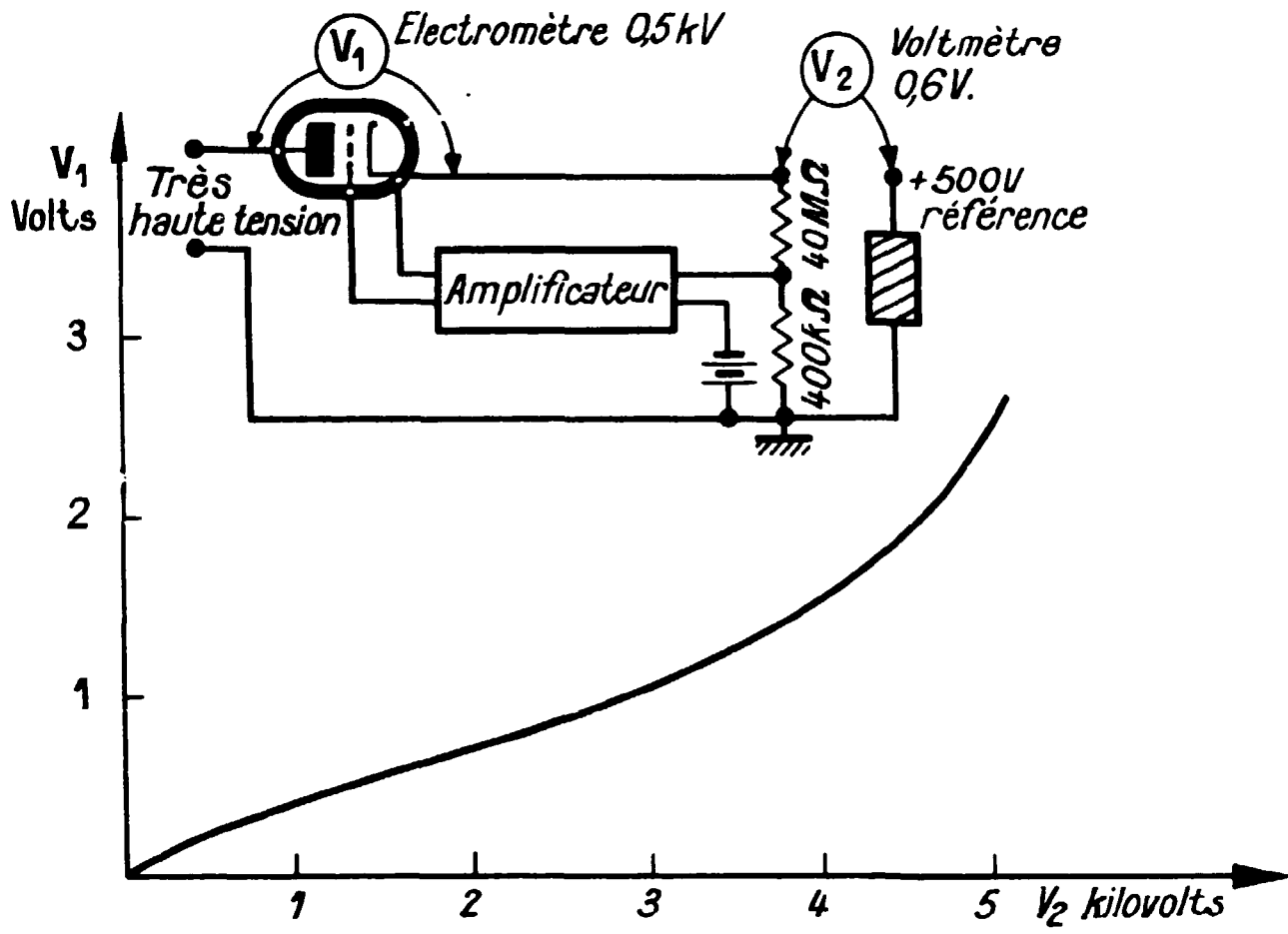


fig.11

La tension à l'entrée de l'amplificateur

$$V_e = \frac{r U}{R + r} - e$$

La tension sur la grille de la 450 T.H.

$$V_s = A \left(\frac{r U}{R + r} - e \right)$$

A : gain de l'amplificateur

ρ : résistance interne de la lampe

L'équation de la lampe

$$\rho I = k V_s + E - U$$

k : coefficient d'amplification de la lampe

qui devient, en remplaçant V_s par sa valeur

$$\rho I = Ak \left(\frac{r U}{R + r} - e \right) + E - U$$

soit

$$\rho I = U \left(\frac{k A r}{R + r} - 1 \right) + E - k A e$$

Pour de petites variations cette expression devient :

$$\rho \Delta I = \Delta U \left(\frac{k A r}{R + r} - 1 \right) + \Delta E$$

Soit, en définitive

$$\frac{\rho |\Delta I| + |\Delta E|}{U} = \frac{|\Delta U|}{U} \left(\frac{k A r}{R + r} - 1 \right)$$

Or, on désire

$$\frac{\Delta U}{U} \leq \frac{1}{2000} \quad \text{pour } U \geq 10 \text{ kV.}$$

En fonctionnement normal la polarisation est telle (-75V) qu'il y a 2500 V entre plaque et cathode (la lampe peut supporter 5 kV) de la 450 T.H.

ΔE peut varier de ± 2500 V

$\rho \Delta I$ peut varier aussi de 2500 V.

On en déduit :

$$A \geq 2700$$

Après avoir réalisé l'appareil nous avons mesuré le gain entre la grille de la lampe 450 T.H. et l'entrée de l'amplificateur : il était de 4000 environ.

B) Régulation dynamique.

La chaîne de mesure de résistances est doublée par un diviseur capacitif (0,01, 1 μ F) qui a pour effet d'augmenter la rapidité de réponse et le gain du système pour les fréquences élevées.

Le résultat immédiat en est l'atténuation du ronflement à 100 c/s.

REGULATION.

La 450 T.H. étant isolée de la masse, (par le transformateur haute fréquence) la stabilisation absolue est indépendante du niveau de sortie de la haute tension régulée.

Par conséquent, la stabilisation relative s'améliore quand la haute tension de sortie croît.

On se fixe une tension U d'utilisation aussi basse que l'on veut, en faisant réguler le système et on mesure la tension (V_1) qui existe entre la cathode de la 450 T.H. et une force électromotrice de référence quand on fait varier la tension (V_2) plaque cathode de la 450 T.H. entre 0 et 4 kV.

La force électromotrice de référence est constituée par 5 éléments de piles 103,5 V en série.

On augmente la haute tension sur la plaque de la 450 T.H. (à l'aide du transformateur à curseur) jusqu'à ce que la tension V soit nulle.

On se place alors au début de la plage de régulation en agissant sur le potentiomètre de réglage fin.

A ce moment :

$$V_1 = 0 \text{ V} \quad V_2 = 0 \text{ kV}$$

On augmente la tension d'alimentation (avec le transformateur à curseur) et on note les indications correspondantes de V_1 et V_2 .

On obtient la courbe représentée sur la figure 11, page 18.

Pour une variation extrême de 5 kV sur V_2 , V_1 varie d'environ 2,5 V.

La haute tension pouvant fonctionner entre 10.000 et 50.000 V, la précision de la régulation se situe entre

$$\frac{2,5}{10.000} \text{ et } \frac{2,5}{50.000} ;$$

elle est meilleure que la précision demandée, $\frac{1}{2000}$.

Ces résultats ont été confirmés par le fonctionnement de l'appareil.

La planche I représente le schéma général de cette partie de l'équipement.

REGULATION D'INTENSITE 0-20 A.

SPECIFICATIONS.

Cette régulation a été réalisée pour maintenir constant à $1/2000$ près le courant alimentant l'électro-aimant servant à créer le champ de déflexion magnétique du séparateur d'isotopes.

Ce courant doit être réglable de façon continue de 0 à 20 ampères.

PRINCIPE.

Le courant de l'électro-aimant est mesuré et sa mesure est comparée à une valeur de référence. On obtient ainsi un signal d'erreur qui, après amplification, commande la génératrice.

Deux méthodes ont été essayées pour mesurer la différence entre la valeur de référence et la mesure du courant à réguler.

1°) Comparaison par l'intermédiaire d'un champ magnétique.

Le schéma de principe en est représenté par la figure 12, page suivante.

On fait tourner, d'une part une bobine dans le champ produit par un électro-aimant parcouru par le courant à mesurer, et, d'autre part, une autre bobine dans le champ d'un aimant permanent, ces bobines étant solidaires.

En conséquence, la première bobine donne une tension alternative dont l'amplitude est proportionnelle au courant à mesurer, et la seconde une tension proportionnelle au champ permanent, donc constante. Le rapport de ces deux tensions est indépendant de la vitesse de rotation et la précision reste bonne malgré les petites fluctuations de vitesse du moteur entraînant les deux bobines.

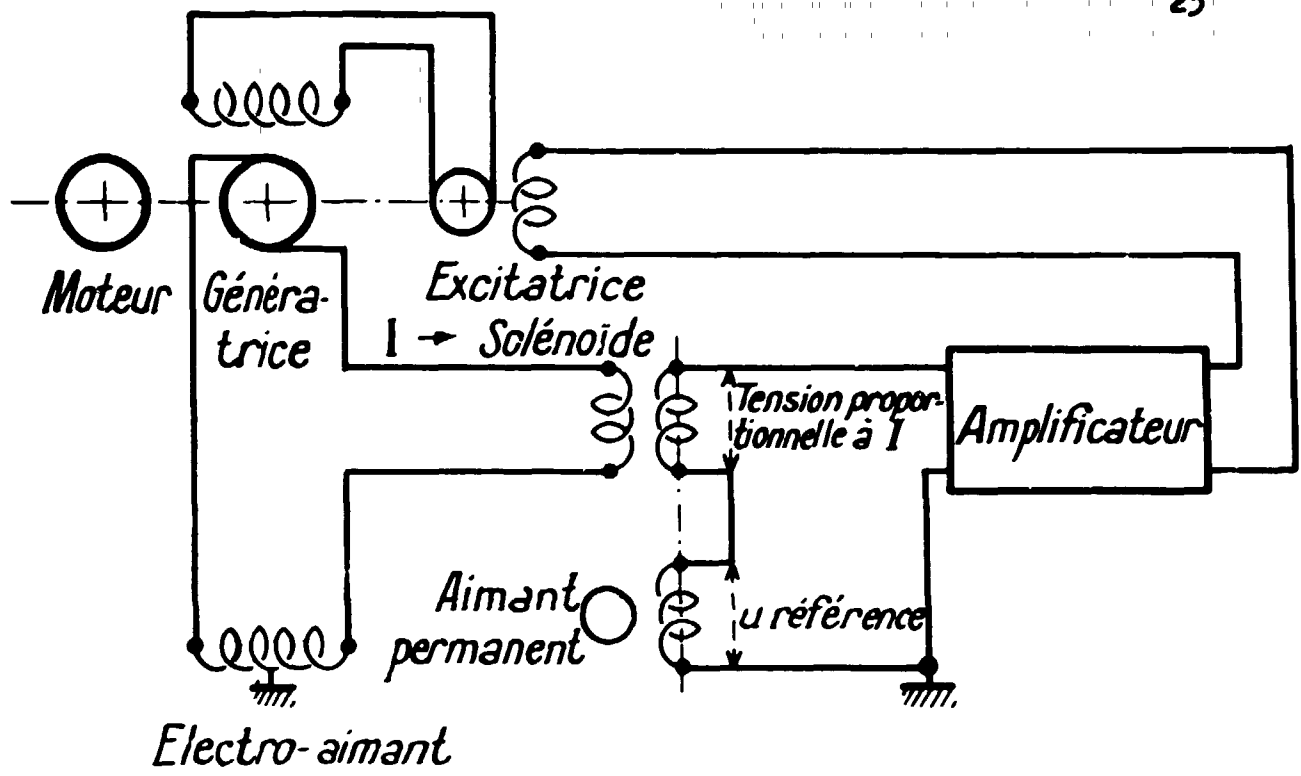


fig.12

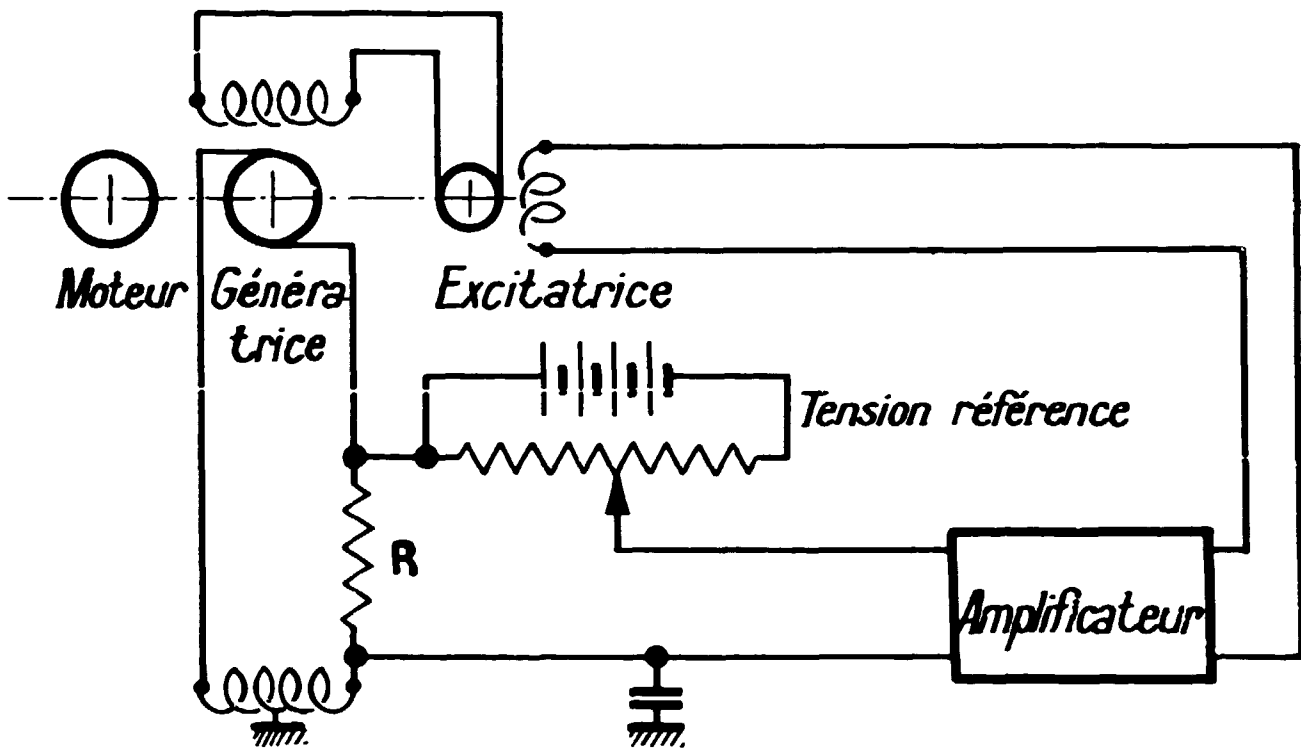


fig.13

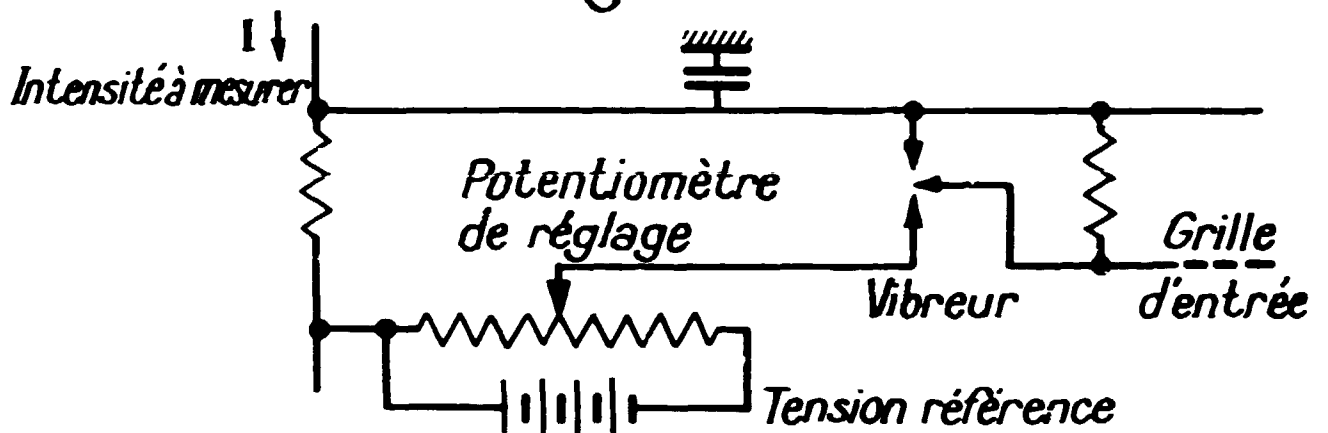


fig 14

L'opposition de ces deux tensions fournira la tension d'erreur.

2°) Comparaison par l'intermédiaire d'une résistance (figure 13, p.23).

On intercale dans le circuit d'utilisation une résistance de mesure. La tension produite à ses bornes par le passage du courant est opposée à une tension de référence.

La différence de ces deux tensions détermine la tension d'erreur.

AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE CES DEUX METHODES.

AVANTAGES.

Emploi d'une bobine tournante :

- emploi d'amplificateurs à courant alternatif ;
- à vitesse de rotation constante, la tension de référence est rigoureusement fixe.

Emploi d'une résistance :

- grande simplicité de réalisation ;
- usure inexistante.

INCONVENIENTS.

Emploi d'une bobine tournante :

- difficulté de réalisation mécanique du système tournant ainsi que des bobines ;
- les relais et les collecteurs introduisent des crachements ;
- la fréquence du courant alternatif créé est relativement basse, d'où impossibilité d'éliminer le ronflement à 50 Hz par des filtres et risques de batters.

Emploi d'une résistance :

- dissipation d'une forte puissance par effet Joule ;
- nécessité d'avoir une résistance fidèle ;
- nécessité d'utiliser un amplificateur à courant continu de faible dérive, pratiquement un amplificateur à vibreurs.

RESULTATS.

Les difficultés de construction d'ordre mécanique, l'usure des frotteurs, les impulsions dues aux mauvais contacts des balais, nous ont contraints à abandonner le système utilisant une bobine tournante.

Après essais nous avons adopté la seconde méthode qui emploie une résistance.

REGULATION D'INTENSITE PAR RESISTANCE.

Le schéma de principe en est représenté par la figure 13, page 23.

L'ensemble qui fournit la puissance se compose d'un moteur asynchrone entraînant : une génératrice pouvant fournir 20 A sous 600 V et une excitatrice en bout d'arbre laquelle a besoin d'une dizaine de watts d'excitation pour que la génératrice fournisse sa puissance maximum.

La génératrice alimente l'électro-aimant de déflexion des ions ; dans le circuit de celui-ci on intercale la résistance de mesure.

La tension prélevée à ses bornes est opposée à une tension de référence. La tension d'erreur ainsi déterminée est amplifiée et sert à exciter la dynamo excitatrice.

Circuit d'entrée (figure 14, page 23).

La tension de référence est constituée par une batterie d'accumulateurs débitant sur un potentiomètre.

La point milieu de l'électro-aimant étant à la terre il est nécessaire que la masse de l'amplificateur soit distincte. Cette fausse masse est reliée à la terre par l'intermédiaire d'un condensateur de forte valeur et de fort isolement (20 μ F - 600 V au papier).

Résistance de mesure.

Ses qualités :

Elle doit :

- supporter un débit de 20 ampères, par conséquent dissiper une forte puissance ;
- être fidèle. Aussitôt que sa température de régime est atteinte, la résistance doit rester constante dans le temps.

Pour réaliser cette résistance nous avons choisi de l'acier NYS.2. de Firminy dont la résistivité varie très peu avec la température. Cette résistivité est pratiquement constante entre 0 à 70° et varie de 1,5% de 70 à 200°.

Détermination de cette résistance.

En fonctionnement normal, le courant est susceptible de varier de 0 à 20 A d'une façon continue, aussi avons nous utilisé une résistance unique pour des raisons de commodité d'emploi.

Il faut aussi pouvoir dissiper assez facilement la puissance Joule produite dans cette résistance. On admet 400 W à 20 ampères. La résistance fera donc 1 Ω . La température prise par la résistance est de 50 à 60°, avec un débit de 20 A et une température ambiante de 18°C.

Gain de l'amplificateur en tension.

A l'entrée de l'amplificateur la tension d'erreur est

$$V_e = RI - V_{ref}$$

Après amplification la tension V_e devient : $V_s = A(RI - V_{ref})$
qui est la tension attaquant l'étage de puissance.

Le courant dans l'excitatrice est :

$$I_{exc} = pV_s = pA(RI - V_{ref})$$

d'où, pour de petites variations

$$\frac{\Delta I_{exc}}{I} = pAR \frac{\Delta I}{I}$$

qu'on peut écrire

$$A = \frac{\Delta I_{exc}}{I_{exc}} \cdot \frac{I_{exc}}{I} \cdot \frac{1}{pR} \cdot \frac{I}{\Delta I}$$

Or, il faut que

$$\frac{\Delta I}{I} \leq 5 \cdot 10^{-4}$$

En observant que le maximum de $\frac{I_{exc}}{I}$ a lieu pour
 $I = 20 \text{ A}$ $I_{exc} = 0,1 \text{ A}$

on devra donc avoir

$$A \geq 650$$

AMPLIFICATEUR DE TENSION.

Le signal d'erreur modulé à 500 Hz environ par le vibreur représenté figure 14 est ensuite amplifié sous forme alternative, puis démodulé par un vibreur synchrone du premier (figure 15, page suivante).

AMPLIFICATEUR DE PUISSANCE.

Son schéma en est représenté figure 16, page suivante.

La puissance nécessaire pour l'excitatrice est d'une dizaine de watts. On utilise deux 6V6 en parallèle.

La lampe 6H6 sert à produire un contre courant dans l'enroulement d'excitation pour annuler le flux rémanent dans la génératrice (qui suffit à créer, en l'absence d'excitation un courant de 2 ampères dans l'électroaimant).

Ce contre-courant est d'une dizaine de milliampères et est suffisant pour annuler complètement ce défaut.

L'ensemble des deux amplificateurs donne un gain d'environ 4.000 ; l'amplificateur de tension environ 800.

La tension de référence est constituée par 10 éléments d'accumulateurs utilisés dans leur palier de décharge. Ce sont des éléments DARY (2 V, 4,5 AH). La stabilité mesurée dans le palier de décharge est de $4 \cdot 10^{-5}$ en comparant avec un élément Weston.

Puisque l'on prend une certaine fraction de la tension de référence pour chaque réglage, la graduation du potentiomètre de réglage est linéaire.

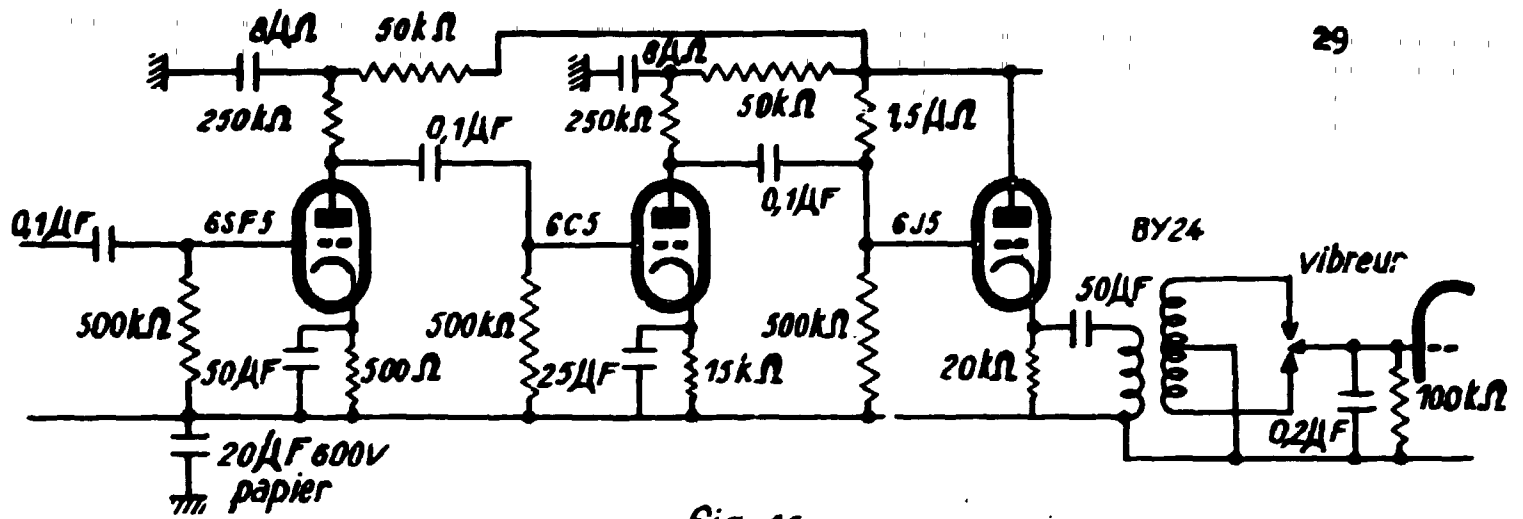


Fig 15

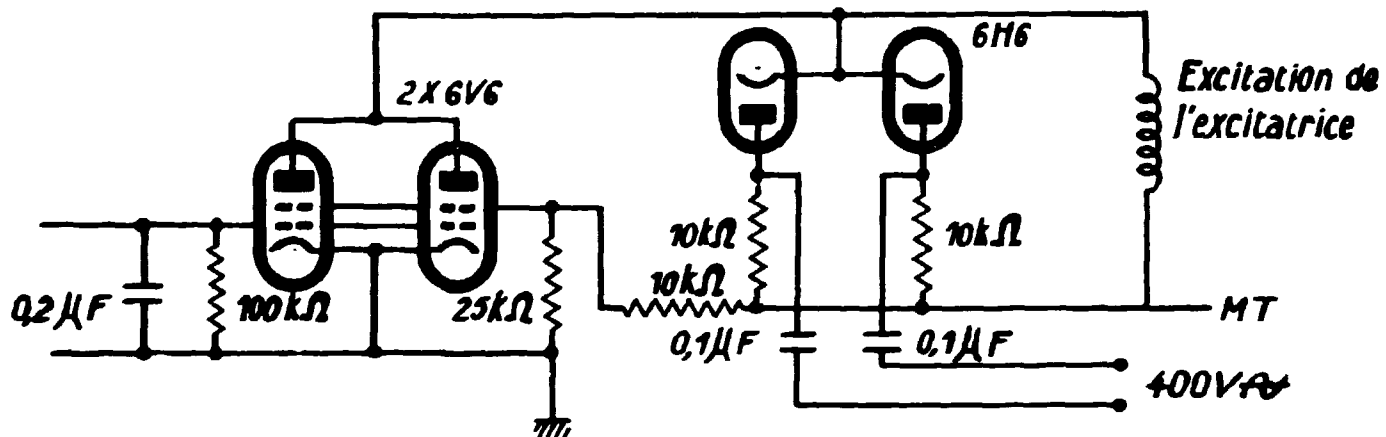


Fig 16

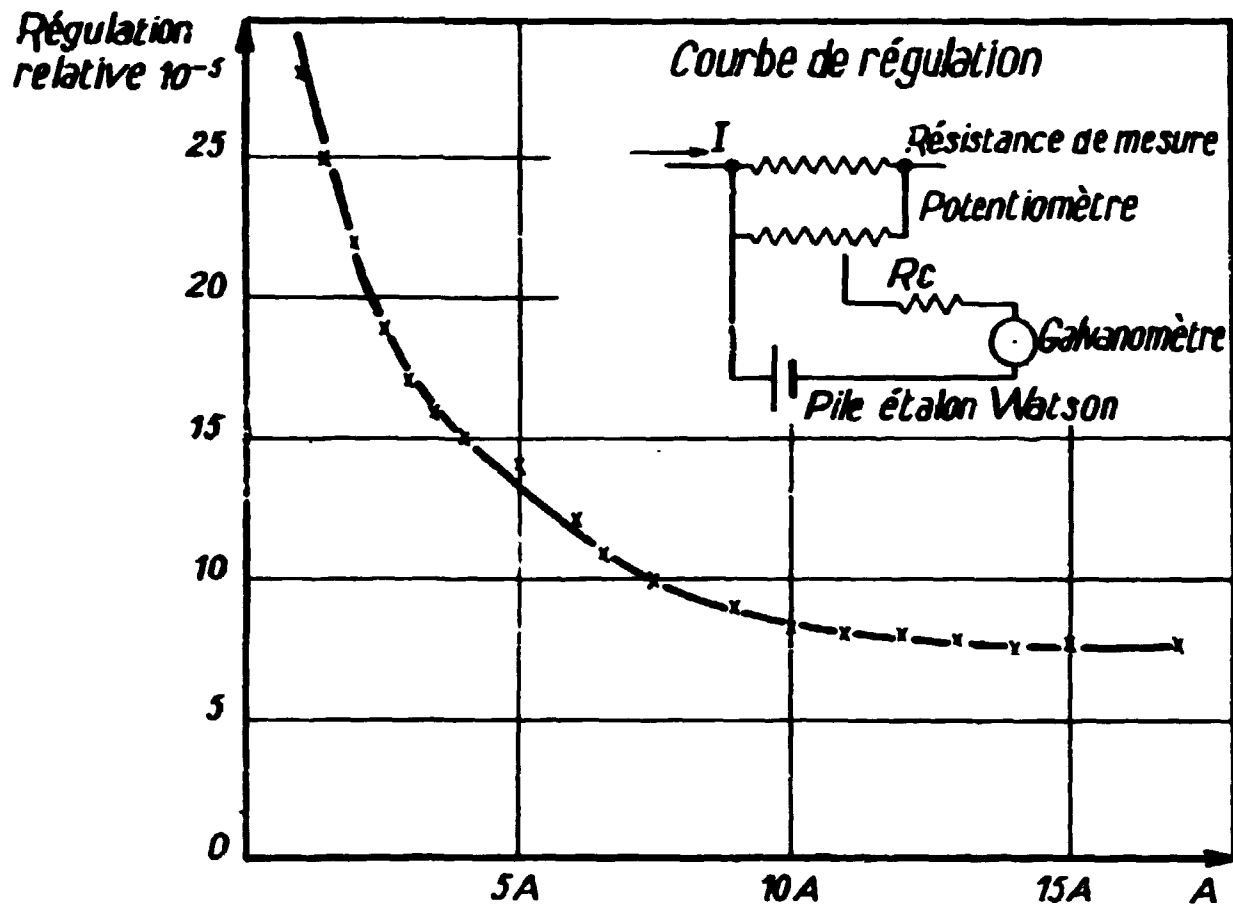


Fig 17

RESULTATS.

La précision est d'autant meilleure que l'intensité est plus grande.

Un relevé expérimental de la courbe de régulation est porté figure 17, page précédente. On a comparé la tension aux bornes de la résistance de mesure à la force électromotrice d'une pile étalon Weston et on a noté le maximum de fluctuations au cours de dix minutes.

La précision varie de $\frac{28}{100.000}$ à 2 ampères,

à

$\frac{9}{100.000}$ à 16 ampères.

La fréquence de coupure d'un tel système est basse (inertie du groupe). Cela n'est pas gênant pour les variations du secteur, qui ne sont pas transmises, mais cette régulation ne peut compenser les irrégularités dues à la commutation. Cela nous a conduits à employer une batterie de condensateurs (400 μ F - 600 V) en parallèle sur le circuit d'utilisation.

La planche II représente le schéma général de cet appareillage.

L'utilisation a révélé un bon fonctionnement à l'usage ; cependant, après plusieurs mois de fonctionnement, il apparaît, du fait du vieillissement des vibreurs, des forces électromotrices de contact qui perturbent la régulation, aussi allons-nous adopter un autre type de vibreurs comportant des contacts en or massif.

Manuscrit reçu le 20 Août 1953.

Haute tension non régulée

Haute tension régulée

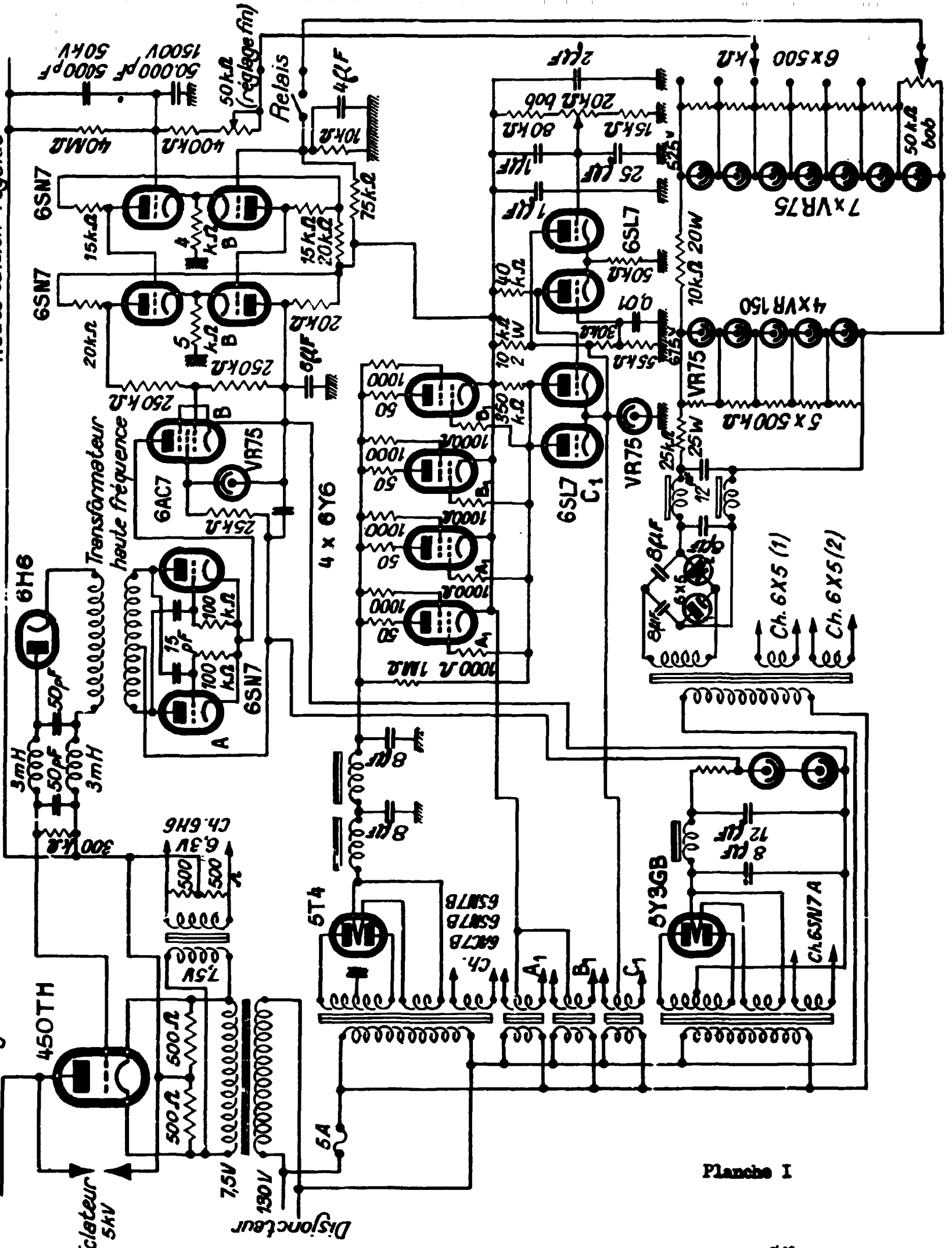


Planche I

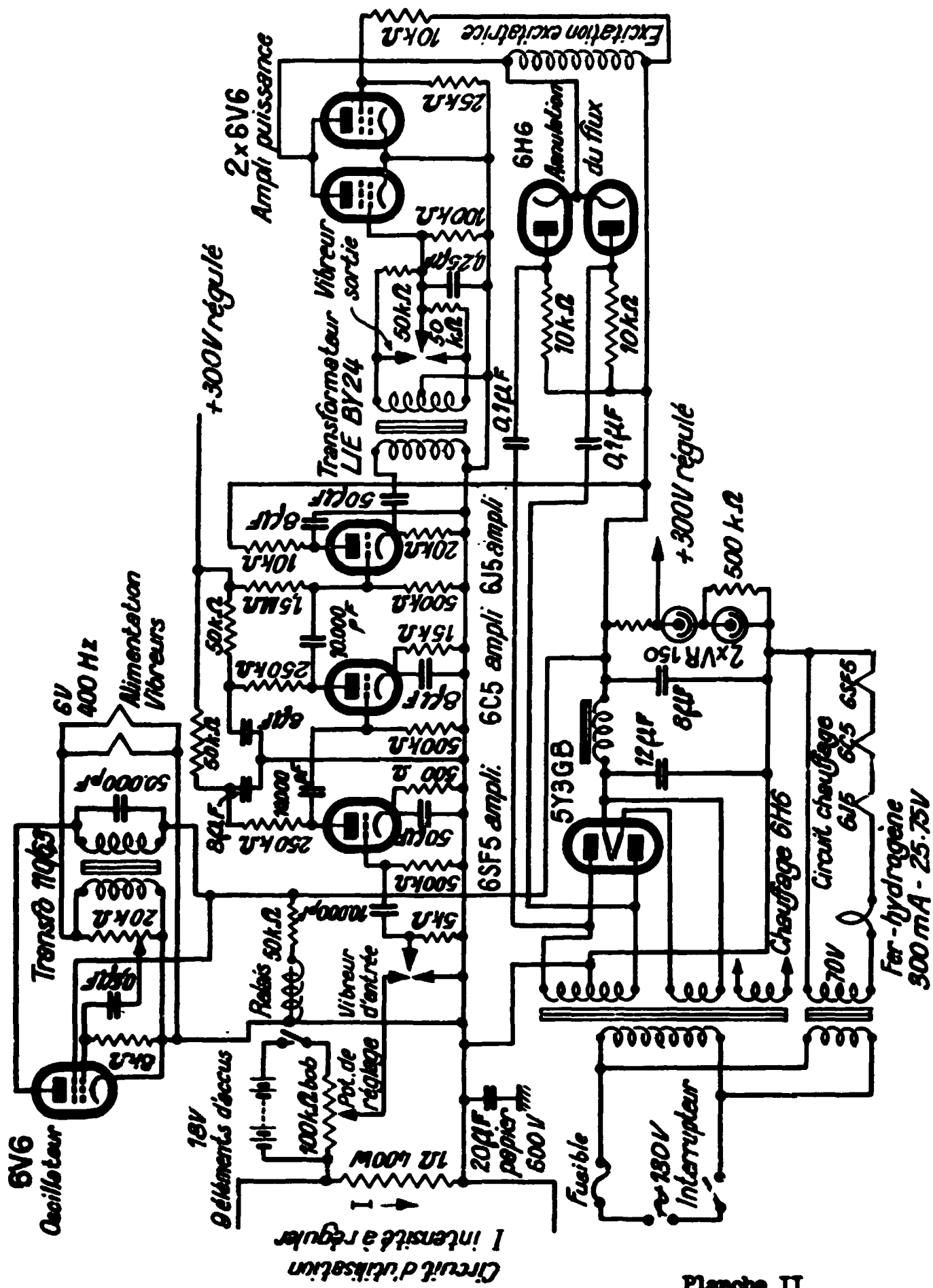


Planche II

FIN