

Avril 1965

LRP 16-65

LABORATOIRE DE RECHERCHES SUR LA PHYSIQUE DES PLASMAS
FINANCÉ PAR LE FONDS NATIONAL SUISSE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

MESURE DES PROBABILITES DE TRANSITION DE QUELQUES

ELEMENTS IONISES : CONSTRUCTION DE L'EXPERIENCE

J. Durand

LAUSANNE

April 1965

LRP 16-65

MESURE DES PROBABILITES DE TRANSITION DE QUELQUES
ELEMENTS IONISES : CONSTRUCTION DE L'EXPERIENCE

J. Durand

Abstract

An arc of 0,5 msec duration, the current of which can reach 10'000 Amp., is described.

The arc plasma is in thermal equilibrium : the temperature reaches 30'000 to 40'000 °K. The density is of the order of 10^{16} cm^{-3} .

The transition probabilities of the lines emitted by the arc will be measured with the described spectroscopic device.

Finally, the possibility is shown of measuring currents of 10^4 Amp. and more with a shunt, even if the frequency reaches several MHz.

Lausanne

Mesures des probabilités de transition de quelques éléments ionisés :

Construction de l'expérience

Généralités

Une partie importante des mesures que l'on peut faire sur un plasma nécessite la connaissance des probabilités de transition des raies émises. Or en général ces probabilités ne peuvent pas être calculées avec une précision suffisante. Nous avons donc entrepris de les mesurer pour les raies qui sont émises par un plasma en équilibre thermique à une température de 30.000 à 40.000 °K et pour une densité de l'ordre de 10^{16} cm⁻³.

Les premiers résultats se rapporteront aux raies émises par le N III et le O III dans le visible et le proche ultra-violet.

Le plasma se forme dans une enceinte de quartz (fig. 1) (1). L'énergie est apportée par une ligne LC de 7 kJ qui se décharge dans le plasma. Le courant maximum est de 10 kA, la durée utile de la décharge de 0,5 msec.

L'observation se fait suivant l'axe du tube de décharge. Les conditions y sont suffisamment homogènes pour qu'il suffise d'apporter une petite correction due aux zones froides des bouts du tube. La résolution dans le temps est donnée par un miroir tournant qui fait passer l'image du tube de décharge devant la fente du spectrographe. Le temps d'ouverture utile peut être facilement réduit à 0,1 msec.

La mesure se fait par plaque photographique. L'étalonnage en énergie avec un filtre étagé et la lumière d'un arc au carbone est répété sur chaque plaque. Le noircissement des plaques est mesuré au photomètre puis la conversion noircissement-énergie et les intégrations nécessaires pour obtenir l'énergie totale émise par les raies se font sur la calculatrice IBM 7040 de l'EPUL. (2)

(1) Le tube est analogue à celui décrit par H. Wulff - Z. Phys. 150, 614 (1958)

(2) Nous présentons ici le travail de montage de l'expérience et les problèmes qui s'y rattachent. Les premiers résultats expérimentaux sont également indiqués. La méthode de mesure de la probabilité, la recherche théorique et expérimentale de conditions de mesure optimum et les résultats du travail seront présentés dans une publication ultérieure.

Montage de la partie électrique de l'expérience

1) Source d'énergie

Le courant qui traverse le plasma (voir fig. 2) provient de 3 batteries différentes de condensateurs :

- A) Décharge d'un condensateur de $0,5 \mu\text{F}$, 25 kV, qui ionise le gaz.
- B) Décharge de préchauffage d'une ligne de 1 kJ pendant 1,5 ms.
Cette décharge doit permettre de chauffer le gaz dans la partie cylindrique du tube. Vu sa longue durée, elle permet également au gaz de se mettre dans un état stationnaire (amortissement des mouvements de particules de la partie chaude vers la partie froide de la décharge). L'énergie est assez faible pour ne pas provoquer d'attaque des parois du tube.
- C) Décharge principale, ligne de 7 kJ, courant jusqu'à 10.000 A., durée 0,5 ms.

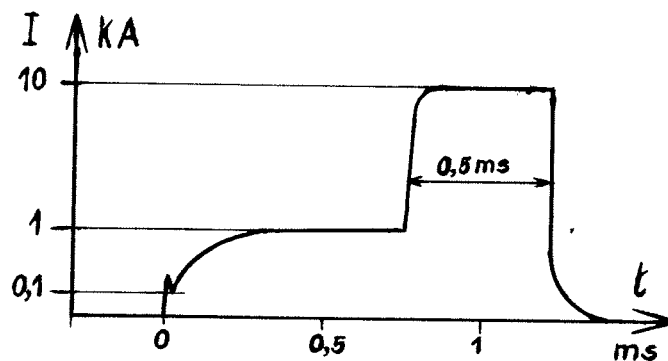


Fig. 2. Forme du courant de la décharge.

Les caractéristiques détaillées et des indications sur le montage des lignes sont rassemblées dans l'annexe No. 1.

Un ignitron de court-circuit connecté en parallèle avec le tube de décharge s'allume dès que la mesure est terminée. Ainsi la fin de la décharge ne passe pas dans le plasma, ce qui diminue l'attaque des parois du tube.

2) Alimentation

Les alimentations des 3 batteries de condensateurs sont montées en doubleur de tension avec un condensateur limiteur de courant. Les tensions maximum de sortie sont réglées à l'aide de transformateurs variables.

Le taux de répétition de la décharge est donné par la puissance de l'alimentation de la décharge principale. On a choisi une puissance max. de 4 kW qui donne une décharge toutes les 4 s. à la tension maximum. Il est également possible de travailler à 3 kV à la place de 5 kV avec un autre condensateur de limitation de courant, la durée de charge est alors de 1,5 s. Les 2 autres alimentations sont également prévues pour une décharge toutes les 1,5 s. (3).

Les filtres RC protègent les diodes des redresseurs contre les perturbations dues à la décharge. Ils doivent de plus avoir une constante de temps suffisante pour que le courant dans les diodes ne dépasse jamais la limite admissible (10 x la valeur nominale), même lorsque la tension de la ligne de 5 kV oscille entre + 5 et - 5 kV.

3) Mesures de courant

L'étalon de courant est un shunt de 5,71 mΩ monté coaxialement pour éviter les inductions parasites. La résistance est constituée par un cylindre de constantan de 0,1 mm d'épaisseur. La profondeur de peau ne joue pas de rôle dans le domaine de fréquence intéressant (voir annexe 2).

Les mesures avec le shunt obligent à mettre le retour du courant de décharge et l'oscilloscope à la même masse. La boucle de terre ainsi formée provoque alors des signaux perturbateurs. Pour les éviter, un transformateur de courant a été monté puis étalonné avec le shunt (voir également annexe No. 2).

4) Commandes et sécurités

Le circuit de commande comprend un circuit d'entretien et un circuit de charge.

Le circuit d'entretien ne peut être enclenché que lorsque toutes les conditions de sécurité sont remplies (entre autres que l'eau de refroidissement circule, que les court-circuits des lignes soient levés). Une simple pression sur le bouton de secours déclenche ce circuit, ce qui fait tomber les court-circuits, et met ainsi toute la partie haute

(3) Dans le montage actuel, les résistances de filtrage ne supportent pas plus de 1 décharge toutes les 15 s. et les condensateurs limiteurs de courant ont leur valeur la plus faible.

tension de l'installation à la terre.

Le circuit de charge commande l'alimentation des redresseurs. Il ne peut être enclenché que lorsque le circuit d'entretien fonctionne. La charge peut être arrêtée soit manuellement, soit automatiquement lorsque la tension de charge de la ligne 5 kV arrive à une valeur prédéterminée.

5) Système de temporisation

Un miroir tournant envoie la lumière de la décharge sur la fente d'entrée du spectrographe au moment de la mesure. Ce miroir donne également le signal de déclenchement de la décharge à l'aide d'une lampe et d'une photocellule. Les signaux de la photocellule sont d'abord amplifiés et mis en forme (l'amplificateur est décrit dans l'annexe No. 3), ils arrivent ensuite sur un relais à mercure qui se ferme lorsqu'il reçoit le signal de commande de déclenchement de la décharge. Les signaux de la photocellule peuvent alors passer dans un flip-flop qui bascule sous l'influence du premier d'entre eux et ferme le passage pour les suivants. Le signal devenu ainsi unique déclenche l'expérience.

Le réglage de retard global peut se faire en déplaçant la lampe et la photocellule sur un cercle passant par l'axe du miroir tournant (voir fig. 4). L'échelonnement dans le temps des 3 décharges et du court-circuit est ajusté avec des unités de retard Tektronix 161.

6) Perturbations

Pour permettre de faire les mesures sans cage de Faraday, il faut diminuer les perturbations. Les précautions suivantes se sont révélées heureuses :

Blindage des lignes de décharge

Suppression des boucles de terre

Séparation du retour de la décharge et de la terre

Séparation du retour de l'alimentation et de la terre.

Partie optique

1) Tube de décharge

Le tube est en quartz, il est lié aux électrodes avec une colle à très basse tension de vapeur (4). L'étanchéité entre les fenêtres d'observation et le tube est obtenue avec des joints O-ring. Ce montage permet de changer facilement les fenêtres dès que l'on observe des traces d'attaque de leur surface (après quelques centaines de décharges).

Le tube est pompé jusqu'à 10^{-6} torr avec une pompe à diffusion, puis rempli du mélange de gaz à étudier sous une pression de 10 à 30 torr. Les gaz employés actuellement sont fournis par la maison Norsk-Hydro (Norvège), ils sont livrés en bouteilles de 1,5 l. dans la qualité "spectroscopiquement pur".

2) Montage optique

La lumière de la décharge impressionne la plaque photographique au moment où l'image du tube de décharge passe devant la fente du spectrographe. La durée de l'ouverture dépend de la largeur du diaphragme d'entrée et de la vitesse de rotation du miroir (fig. 5).

L'optique est telle que la lumière qui arrive en un point d'une raie spectrale est émise par le plasma qui se trouve dans un cône dont l'axe est parallèle à l'axe du tube. L'étude du noircissement d'une raie en fonction de sa hauteur donne ainsi directement l'énergie d'émission de cette raie dans un plan passant par l'axe du tube de décharge. La résolution spatiale est donnée par l'ouverture du cône d'émission, elle est réglée par le diamètre du diaphragme placé entre les 2 lentilles (fig. 5). Les mesures ont toujours été faites avec une résolution dans le tube de 2 à 3 mm. Il est inutile de descendre à des valeurs plus faibles car l'astigmatisme vertical du spectrographe a la même valeur.

Le spectrographe utilisé est un Jarrel-Ash en montage Ebert de 75 cm de distance focale. Son réseau, de 30'000 lignes/pouce, donne une dispersion de 10 angströms par mm dans le premier ordre. L'ouverture,

(4) Cette colle est livrée sous le nom de Torr-Seal par la maison Varian.

de $1/6,3$, est tellement grande que le pouvoir séparateur est fortement diminué par les aberrations optiques. On trouve un pouvoir séparateur max. de $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 25'000$ à $5'000 \text{ \AA}$, alors que la valeur théorique donnée par le réseau est de $120'000$.

Les lentilles du montage optique sont en quartz et le miroir tournant en acier inoxydable aluminisé. Il est ainsi possible de travailler *dans* tout le domaine de $2'000$ à $10'000 \text{ \AA}$.

Le rayonnement du corps noir nécessaire pour avoir un étalonnage absolu des plaques photographiques est donné par un arc au carbone selon Euler (5) placé derrière le tube de décharge et dont l'image est formée au centre du tube. Les absorptions de la lentille et de la lère fenêtre du tube de décharge peuvent être mesurées et doivent être soustraites du rayonnement théorique. L'arc est alimenté en courant continu après un filtrage énergétique de la composante 100 Hz du redresseur. Le courant est stabilisé par un système à selfs saturables, sa valeur est réglée à 80 % de celle du courant qui provoque le sifflement de l'arc. Les électrodes de 6 mm de diamètre sont en carbone pur, qualité "spectroscopique" (6).

3) Mesures

Les mesures faites jusqu'à aujourd'hui sont destinées à définir les conditions expérimentales optima.

Les raies de He I, He II, N II, N III ont des noircissements favorables lorsque le gaz est à une pression initiale de 25 torr et comprend 90 % de He et 10 % de N_2 .

Les premières mesures donnent une température de $32'000 \text{ }^\circ\text{K}$ et une pression de $3,5 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^{-3}$ lorsque le courant de décharge atteint 3 KA (voir fig. 6). La mesure de la température se fait en prenant le rapport des énergies des raies 4713 He I et 4686 He II (pour les détails, voir 7).

(5) Der Graphitbogen als spektralphotometrisches Strahldichtenormal im Gebiet von 0,25 bis 1,8 μ . J. Euler, Annalen der Physik, 11, 203, 1953

(6) Fourni par Ringsdorff, Bad Godesberg. Qualité RW 303

(7) J. Durand, Zf. Naturforschung 18, 281 (1963)

La pression est donnée par la mesure de l'élargissement, dû à l'effet Stark, de la raie 4471 He I. La pression est ici suffisamment élevée pour que le niveau supérieur de la raie puisse être considéré comme dégénéré. L'élargissement suit alors les lois trouvées pour les raies de l'hydrogène (1).

La concentration électronique dépend fortement du courant de la décharge. On peut l'expliquer en considérant que le rapport des pressions avant et pendant la décharge n'est que de 10 environ alors que le rapport des températures au centre du tube dépasse 100. Une partie importante du gaz se trouve donc pendant la décharge dans les volumes morts. Il est compréhensible qu'une variation de l'énergie apportée influence grandement sur le volume et la température de ces volumes morts, donc sur la pression, même si cette variation ne provoque que peu de changements pour la température au centre de la décharge.

L'étude quantitative de l'énergie émise par les raies de N III est commencée. Elle permettra de déterminer les probabilités de transition. Les conditions exactes de mesures et les résultats feront l'objet d'un rapport ultérieur.

Annexe No. 1

Décharge d'allumage

Le condensateur de $0,5 \mu\text{F}$ peut être chargé à 25 kV. Le circuit de décharge qui comprend la self de 25 mHy, l'ignitron, le câble et les 2 résistances de 100Ω est amorti critiquement. La constante de temps est de $50 \mu\text{s}$. et le courant max. de 100 A. (voir fig. 7).

La résistance a été divisée en 2 parties égales, dont une placée directement près du tube de décharge pour éliminer les oscillations H.F. qui se produisent dans le câble (long de 10 m.) au moment de l'allumage du tube.

Les arrivées sur le tube des câbles des autres lignes de décharge ont également été isolées de la tension d'allumage par une self de choc de $2 \mu\text{Hy}$.

Décharge de préchauffage

La tension de charge maximum est de 3 kV, le courant en court-circuit de 1 kAmp et la durée de 1,5 ms.

La ligne travaille presque en court-circuit car la résistance du plasma est beaucoup plus petite que ses 3 ohms d'impédance caractéristique. Il y a donc réflexion et retournement presque complets de la tension lors de la décharge. Ce phénomène provoque une fatigue de l'isolant des condensateurs presque égale à celle d'une tension double de la tension de charge. Pour l'éviter, nous avons monté un ignitron en bout de ligne qui s'allume au moment où la tension devient négative aux bornes des condensateurs. Le signal d'allumage de cet ignitron est pris inductivement sur une des bobines de la ligne, puis amplifié par une unité de thyatron (voir fig. 8).

Lorsque les 2 ignitrons sont conducteurs, la ligne se comporte presque comme un circuit self-résistance. L'énergie dans les condensateurs est nulle et l'énergie magnétique des selfs se dissipe dans les résistances (voir fig. 9).

Le système de décharge a été prévu avec un taux de répétition de $0,7 \text{ s}^{-1}$.

La puissance dissipée est alors de 800 W, ce qui provoque un échauffement assez considérable des bobines. Pour diminuer cet échauffement, on a monté une résistance de 0,1 Ω en série avec l'ignitron de court-circuit, cette résistance absorbe à elle seule plus du 1/3 de la puissance totale. La résistance (un tuyau d'acier inoxydable) et les ignitrons sont refroidis à l'eau.

Le couplage entre les bobines de self changent les caractéristiques de la ligne (8). Dans notre cas il vient :

$$Z = \sqrt{1 - k} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad t = \sqrt{1 + k} \cdot \sqrt{LC}$$

$$\text{où } k = \frac{M}{L}$$

Le calcul donne 0,16 pour la valeur de k, ce qui correspond à une variation de l'impédance de l'ordre de 8 %. Cette variation est sans importance car le courant est mesuré indépendamment des caractéristiques de la ligne (à l'aide d'un transformateur d'intensité).

Décharge principale

La ligne est construite suivant les mêmes principes que pour la ligne de la décharge de préchauffage. Les éléments ont ici les valeurs suivantes :

$$L = 6,25 \mu\text{Hy}$$

$$C = 25 \mu\text{F}$$

$$U_0 = 5 \text{ kV}$$

$$\text{Nombre d'éléments : 20}$$

Les caractéristiques deviennent :

$$I = 10 \text{ kA} \quad (\text{en court-circuit})$$

$$\tau = 0,5 \text{ ms}$$

$$Z = 0,5 \Omega.$$

La résistance d'amortissement est ici de 30 m Ω . Elle absorbe une puissance de plus de 1 kW au taux de répétition maximum de la décharge.

La principale difficulté à résoudre pour cette ligne fut de compenser les inductions mutuelles dues au montage en 3 colonnes (fig. 10). L'in-

(8) Millimicrosecond pulse technique, A.D. Lewis, Pergamon Press.

duction mutuelle M' de bobine à bobine est de 6 % de l'inductivité. Elle ne fait que changer un peu les caractéristiques de la ligne, ce qui est sans importance. Par contre, l'induction mutuelle M des bobines voisines, qui est de 5 % de l'inductivité, provoque une perturbation sur le courant qui atteint 40 %. Pour la diminuer, on a d'une part alterné le sens des enroulements des bobines de la colonne centrale, ce qui interdit au signal perturbateur de croître et, d'autre part, blindé les colonnes l'une par rapport à l'autre avec des plaques de fer de 1 mm d'épaisseur.

Le courant présente alors une constance de 10 % (voir fig. 11), ce qui suffit parfaitement pour les applications envisagées.

Comme pour la ligne 3 kV un ignitron de court-circuit est monté au bout de la ligne. Il empêche la tension aux bornes des condensateurs de se renverser.

Annexe No. 2

1) Shunt de mesure de courant

Le shunt représenté par la fig. 12 sert d'étalon de mesure de courant sur le sablier. La partie résistante (le cylindre intérieur) est constituée par une plaque de constantan de 0,1 mm d'épaisseur. La mesure de la tension se fait par le fil central. Il est ainsi possible de mesurer RI avec une contribution nulle de l'induction mutuelle entre le circuit du courant et le circuit de mesure.

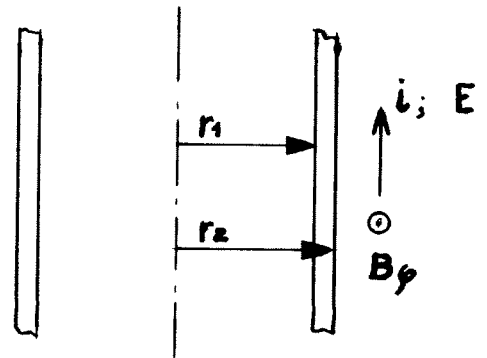
La résistance a été étalonnée avec un pont de Thompson par le laboratoire d'électrotechnique de l'EPUL; sa valeur est de 5,71 mΩ avec une incertitude de $\pm 1/2 \%$.

Il faut encore s'assurer que la réponse en fréquence du shunt est bonne dans le domaine utilisé. Cette réponse dépendra principalement de l'effet de peau dans la résistance. Le champ électrique dans le métal est donné par : (9)

$$\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + k^2 E = 0$$

où $E = a J_0(kr) + b Y_0(kr)$

avec $k^2 = -j \cdot \omega \mu \epsilon$



Le rapport du diamètre à l'épaisseur du cylindre résistant dépasse 300. Il est donc possible de négliger le terme en $\frac{1}{r}$ et les fonctions de Bessel se transforment en exponentielles. Les conditions aux limites $B_\varphi = 0$ pour $r = r_1$ et $B_\varphi = -\mu I / 2\pi r_2$ pour $r = r_2$ donnent la solution :

$$E(r) = \frac{I}{2\pi r_2 \epsilon (r_2 - r_1)} \cdot \frac{\cos k(r - r_1)}{\frac{\sin k(r_2 - r_1)}{k(r_2 - r_1)}}$$

L'impédance de transfert est donnée par le rapport de la tension $E(r_1)$

(9) Rocard, Electricité

au courant à mesurer. Elle est fonction de la fréquence du fait du facteur $k(r_2 - r_1)$. Si ce facteur reste petit, on peut développer en série et il vient :

$$Z = \frac{E(r_1) \cdot L}{I} = R \left[1 - 4,5 \cdot 10^{-2} (\varepsilon/\delta)^4 + \dots \right] \cdot e^{-j \left(\frac{\varepsilon/\delta}{3} \right)^2 + \dots}$$

$$\text{où } \delta^2 = -j \frac{2}{k^2} = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}}$$

$$\text{et } \varepsilon = (r_2 - r_1)$$

Pour le shunt utilisé (constantan de 0,1 mm d'épaisseur), nous avons :

$$\frac{Z}{R} \approx \left[1 - 3,8 \cdot 10^{-4} (f_{\text{MHz}})^2 \right] \cdot e^{-j \frac{f_{\text{MHz}}}{30}}$$

La réponse est juste à 1 % jusqu'à la fréquence de 5 MHz avec pour cette fréquence une rotation de phase de 12 degrés environ.

2) Transformation de courant

Un transformateur de rapport 1/100 avec une résistance de charge de 1 Ω au secondaire permet de mesurer le courant de la décharge sans connexion de terre.

Le noyau a une section de 2,5 x 5 cm et une hauteur utile de 120 mm, il est monté avec un entrefer de 0,5 mm. Le secondaire se compose de 100 spires enroulées sur le noyau et blindées par une feuille de cuivre vis-à-vis du primaire. Le primaire est formé par une bande de cuivre de 100 mm de haut et de 0,5 mm d'épaisseur formant une spire.

Les caractéristiques vues du secondaire sont : (voir schéma)

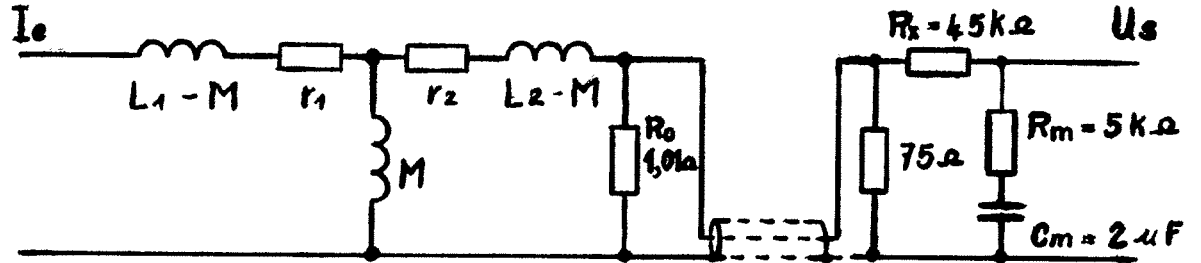
$$M = 16 \text{ mHy}$$

$$L_2 - M < \frac{1}{100} M$$

$$r_2 + R_0 \approx 1,6 \Omega$$

Le circuit de correction augmente la constante de temps du système

dans le rapport $\frac{R_m + R_x}{R_m}$



L'impédance de transfert est donnée par :

$$Z = \frac{U_s}{I_e} = R \cdot \frac{\frac{R_m}{R_m + R_x}}{1 + \frac{L_2 - M}{M}} \cdot \frac{1}{1 - j \cdot \frac{1}{\omega C_m (R_m + R_x)}}$$

avec la condition $R_m C_m = \frac{M}{r_2 + R_0}$

Ce transfo a été étalonné avec le shunt et un montage aux différences. Il a été possible de montrer que :

L'étalonnage en courant est juste à $\pm 1 \%$.

Le temps de montée est plus petit que $1 \mu s$.

La constante de temps de dérivation est plus grande que $100 ms$.

Ces valeurs sont largement suffisantes pour l'application envisagée.

Annexe No. 3

Amplificateur d'impulsion pour photocellule semi-conductrice

Les photocellules du type photovoltaïque (TP 60 de Siemens par exemple) présentent toujours une très grande capacité d'entrée. Il est donc indispensable de les connecter à un amplificateur à faible impédance d'entrée si l'on veut obtenir une grande bande passante.

L'amplificateur dont le schéma est donné par la fig. **13** commence par un étage base-à-la-masse. Le transistor AF 118 (courant dans le collecteur de 0,8 mA) lui donne alors une impédance d'entrée de 30 Ω et la constante de temps avec la photocellule est de moins de 1 μ s.

Le bruit de l'étage d'entrée, avec photocellule, est équivalent à un courant de 0,03 μ A.

Les 2 étages qui suivent servent d'amplificateur variable. Le signal attaque ensuite un trigger de Schmid à niveau de déclenchement variable.

Les 2 derniers étages servent d'amplificateur de sortie et de limiteur d'amplitude. Le signal de sortie est de plus de 20 V sous 75 Ω . Le retard total de l'amplificateur est de l'ordre de 1 μ s lorsque le signal d'entrée est rectangulaire.

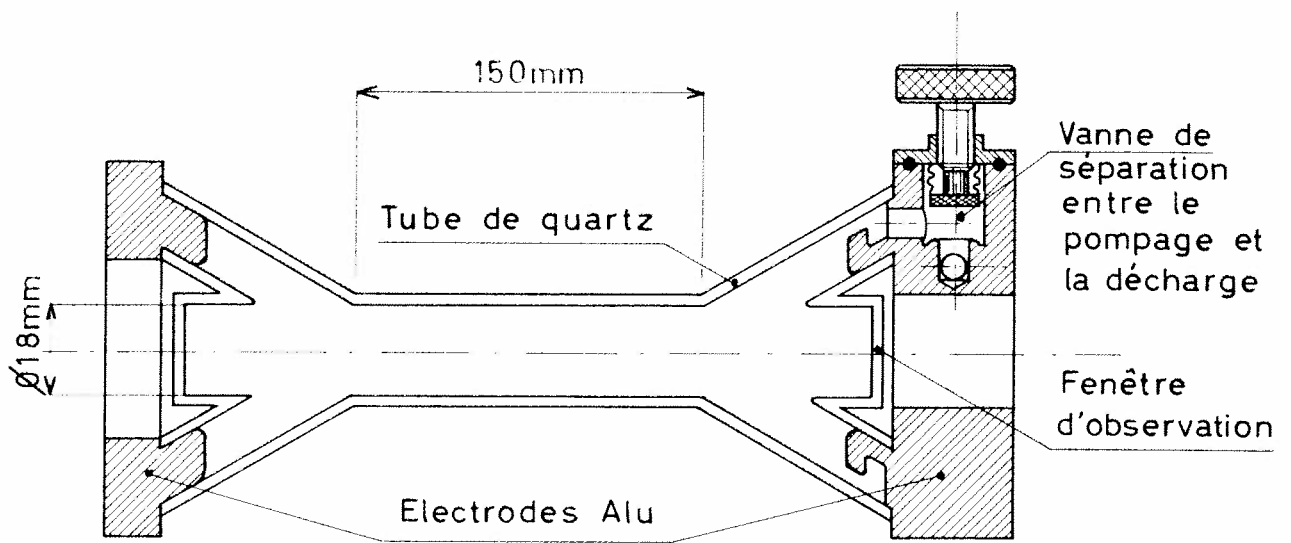


Fig.1 Tube de décharge

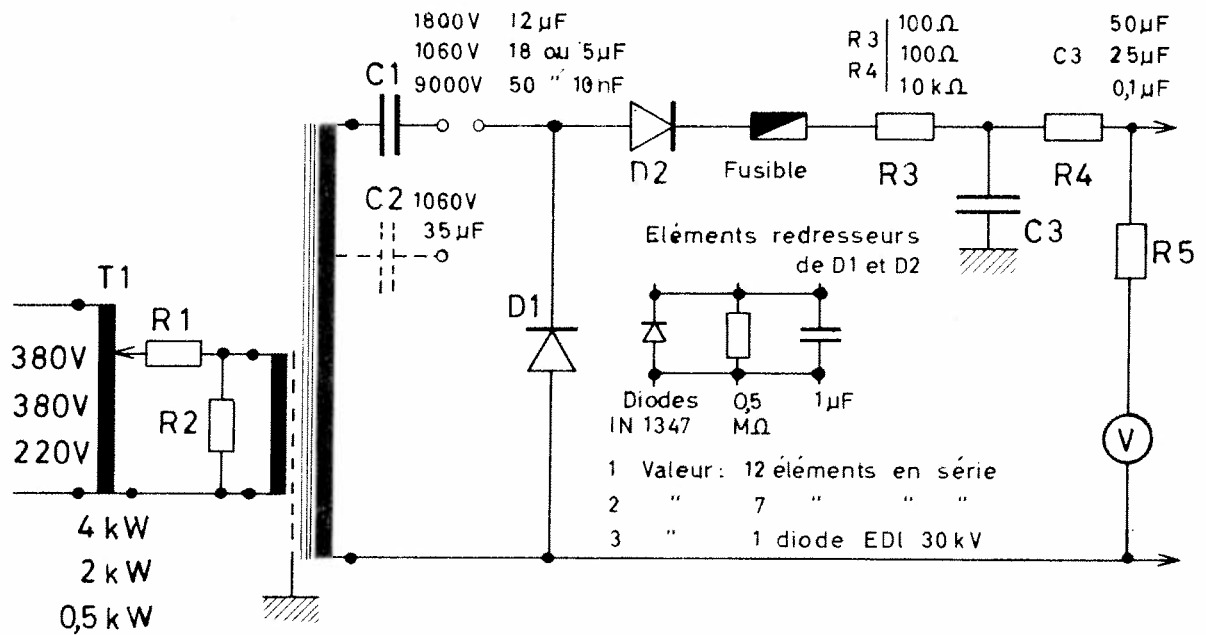


Fig. 3 Schéma des redresseurs

- 1 Valeur redres. 5kV
- 2 Valeur redres. 3kV
- 3 Valeur redres. 25kV

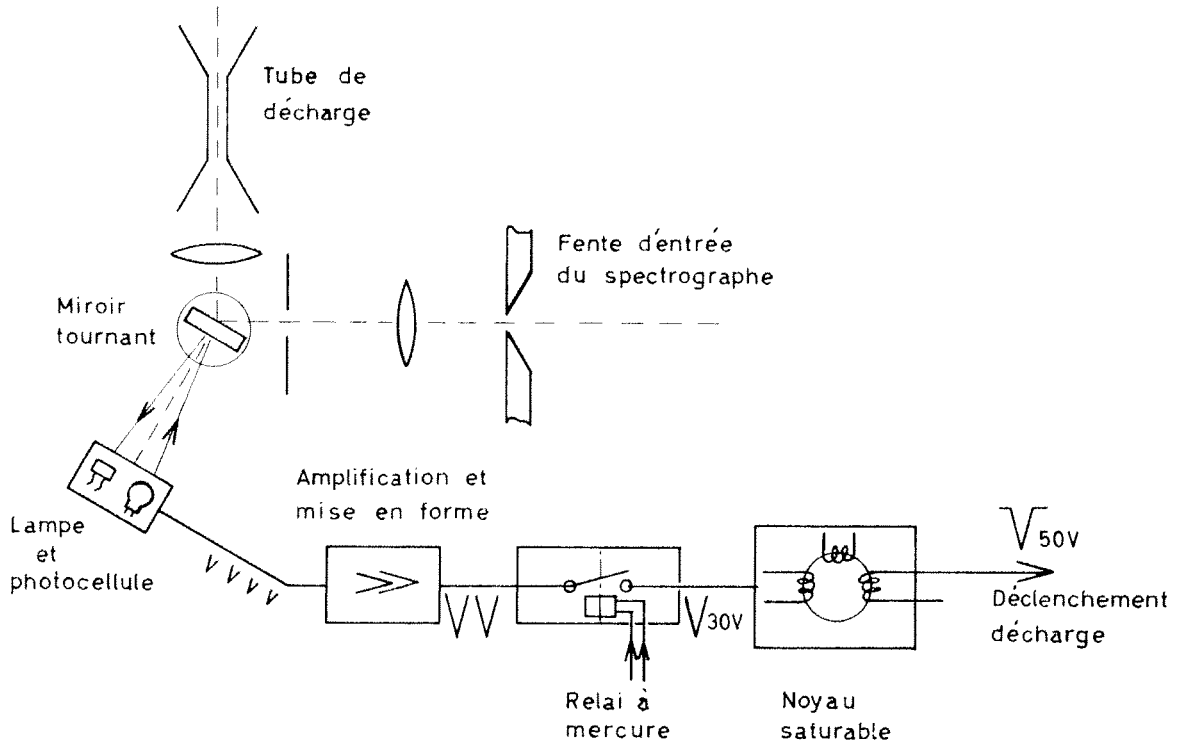


Fig. 4 Schéma de la commande du déclenchement

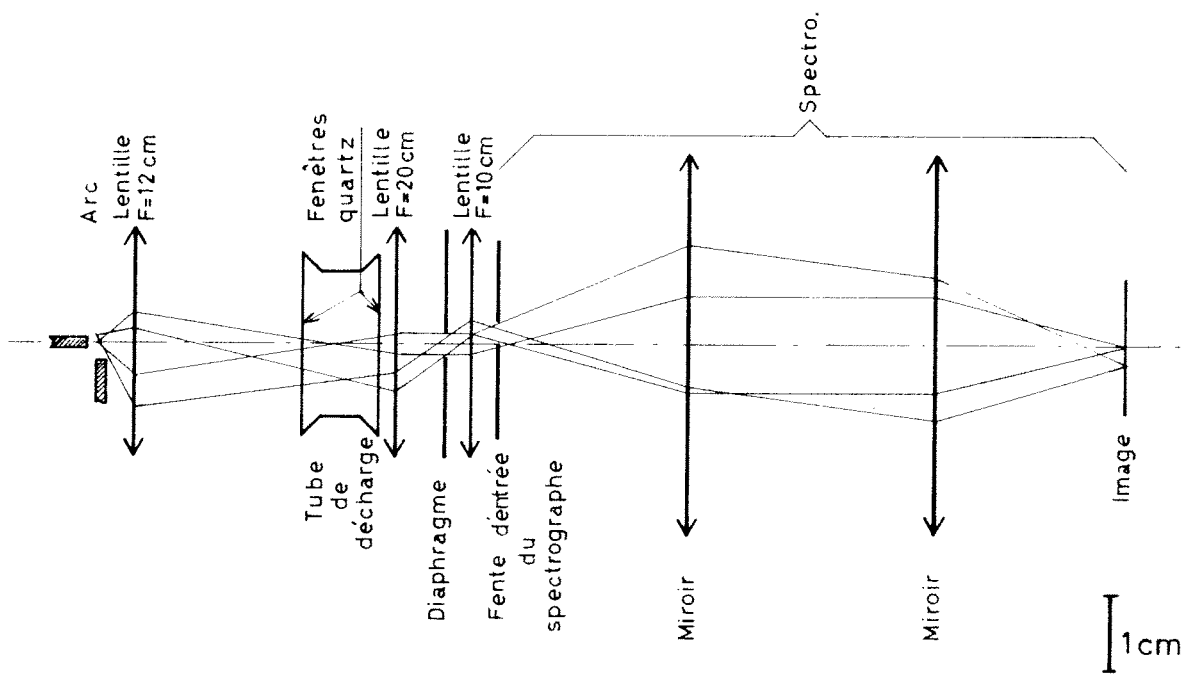


Fig. 5 Montage optique

Echelles: 30cm

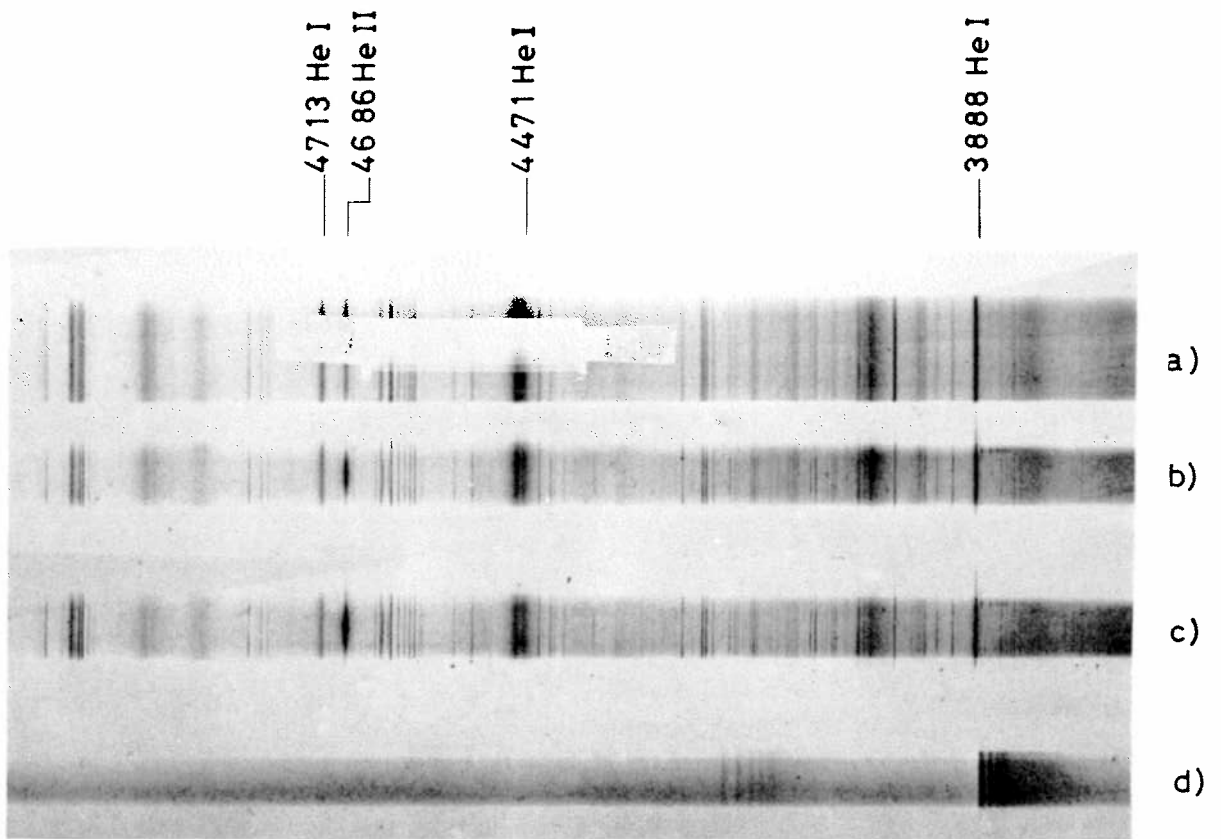


Fig.6 Spectre du mélange 90% He/10% N₂. Courant 3kA
 a) Spectre d'étaionnage
 b) et c) Spectre de mesure
 d) Spectre de l'arc au carbone

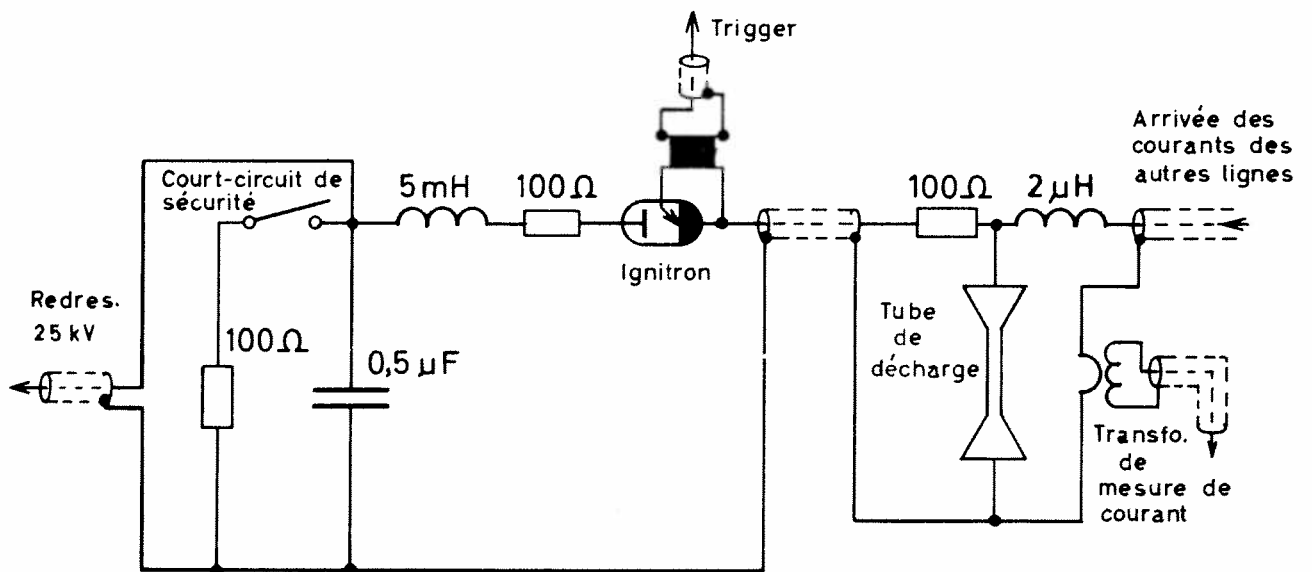


Fig.7 Schéma de la décharge d'allumage

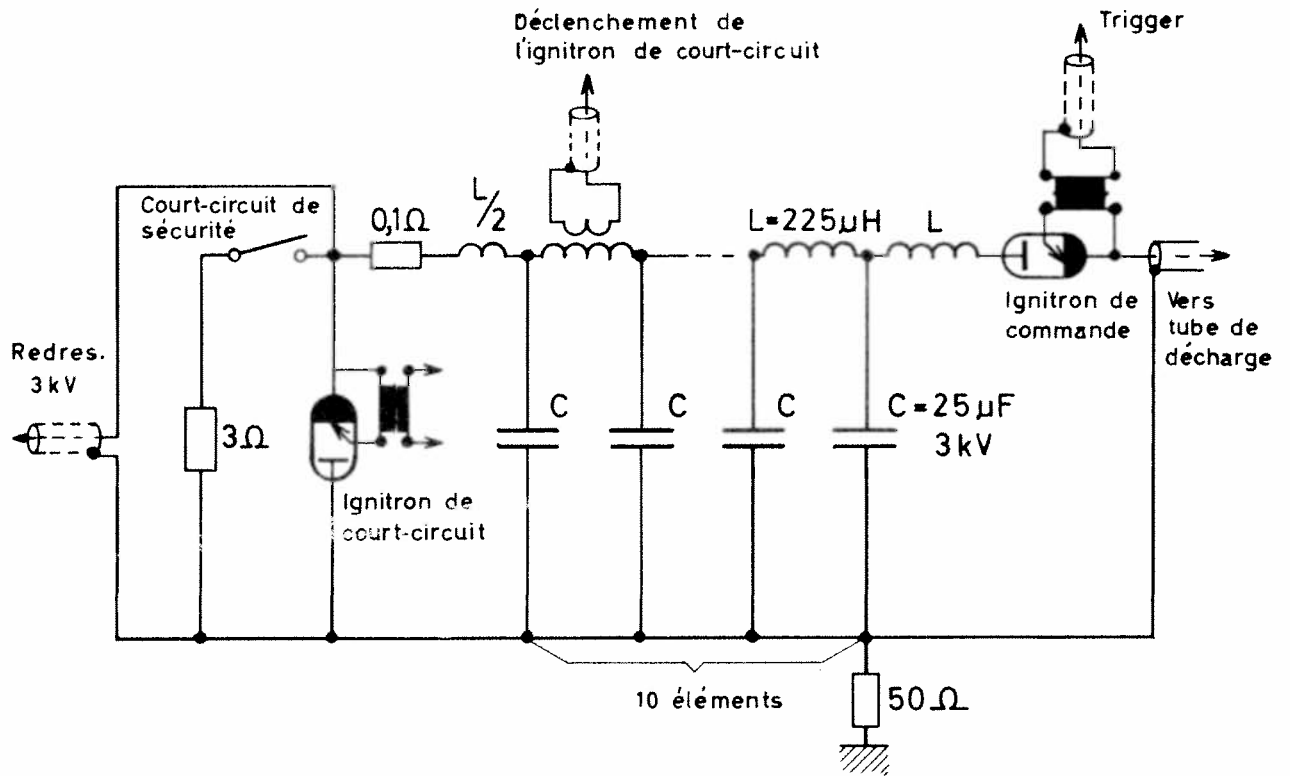


Fig.8 Schéma de la ligne de préchauffage

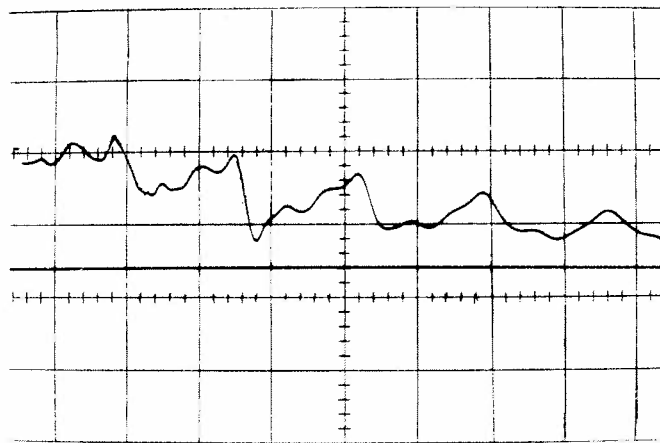


Fig.9 Forme du courant de la ligne lorsque la résistance externe est nulle. Les 2 ignitrons aux 2 bouts de la ligne sont allumés

Echelles: 1ms/cm ; 500 A/cm

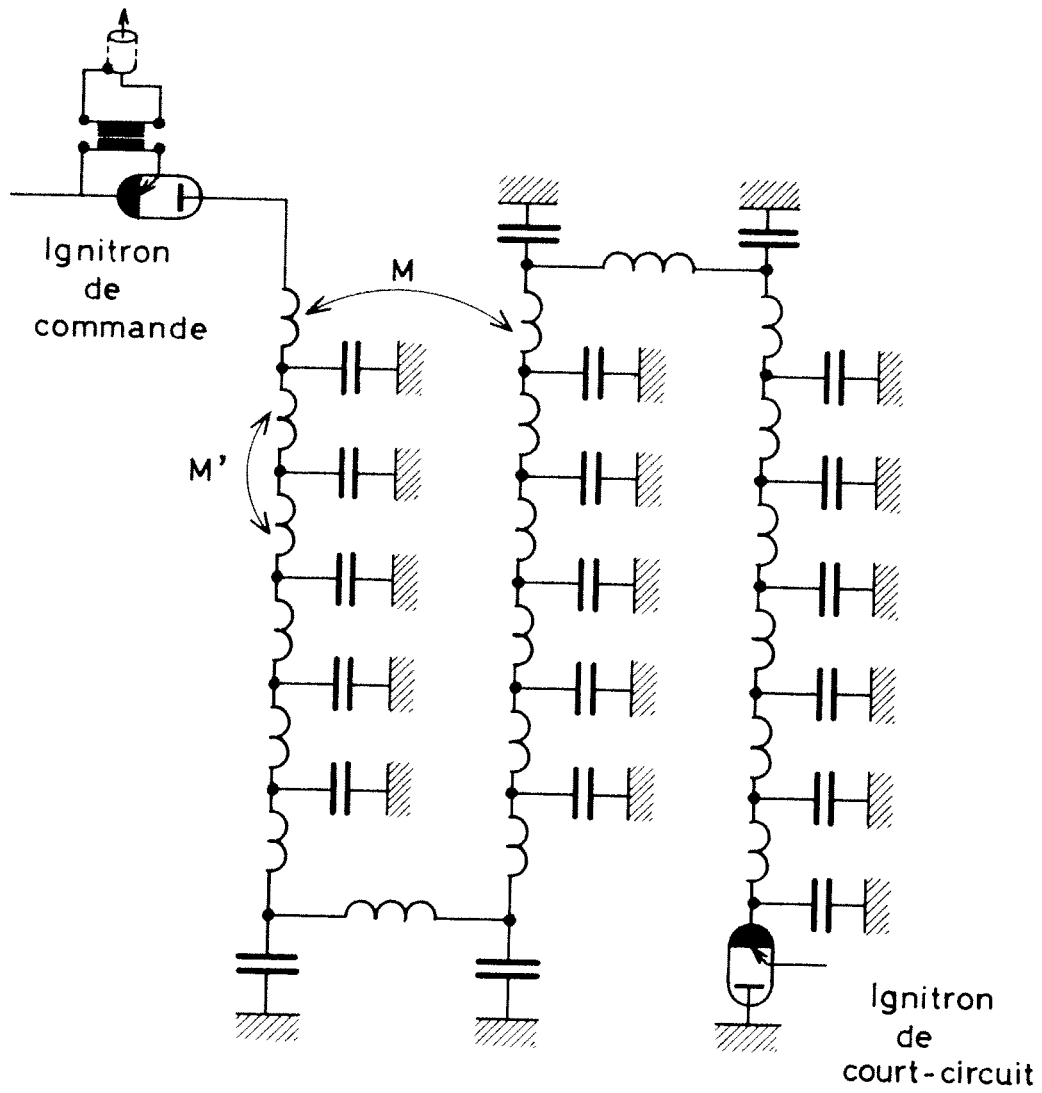


Fig.10 Schéma de montage de la ligne principale

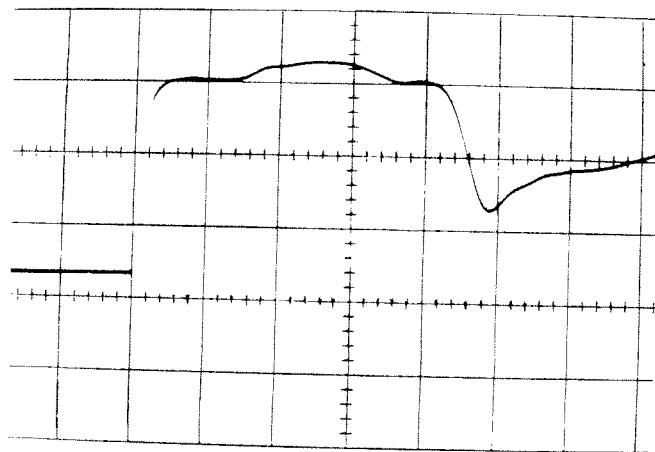


Fig.11 Forme du courant de la ligne principale lorsque les bobines de la colonne centrale sont alternativement bobinées à gauche et à droite et avec le blindage.
Echelles: 0,1ms/cm ; 500 A/cm

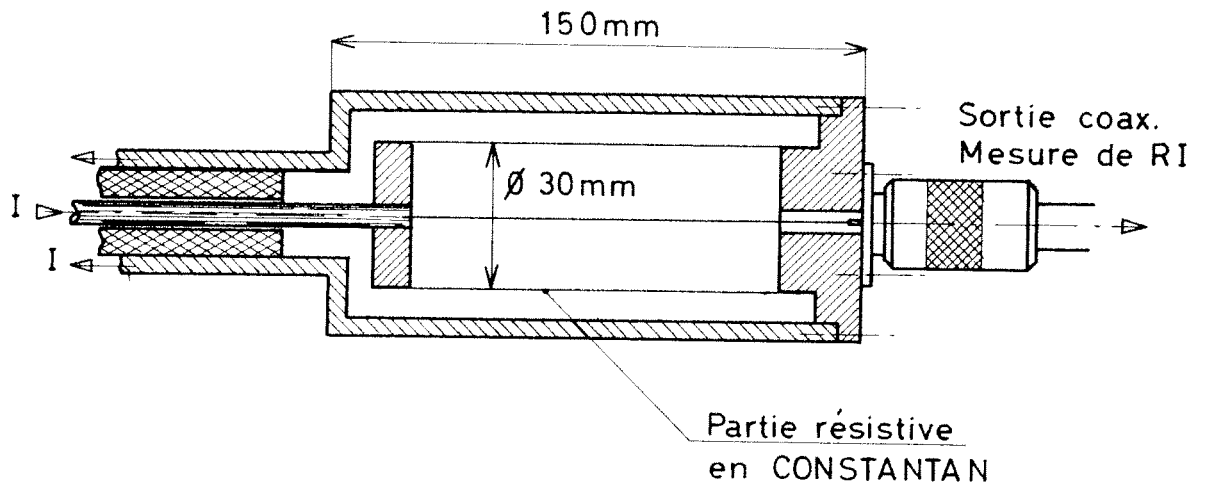


Fig.12 Schéma du Shunt.
Le cylindre de Constantan est soudé à l'étain sur les disques de laiton.

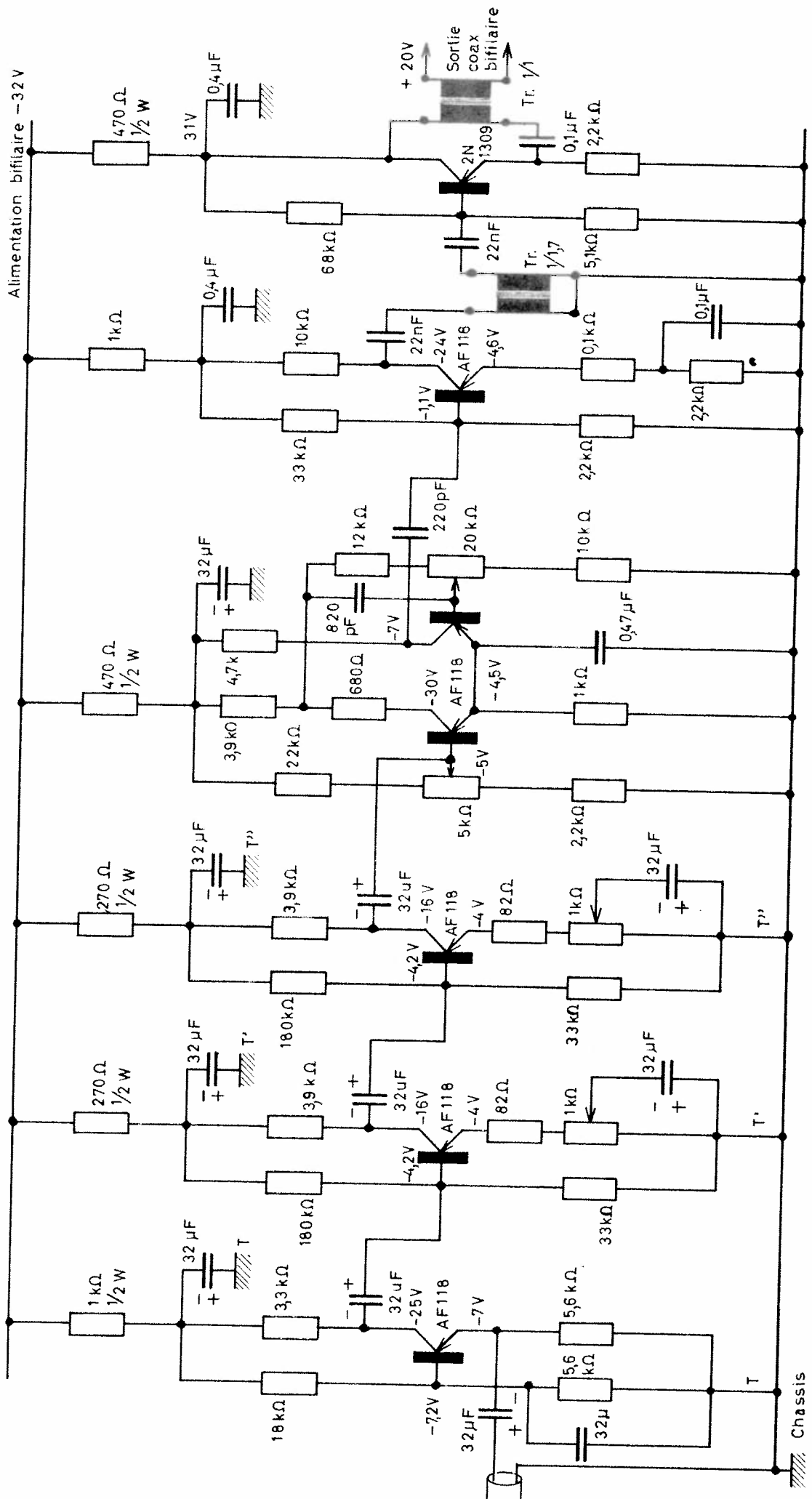


Fig.13 Amplificateur photodiode.