

Juin 1964

LRP 14-64

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

IMPULSIONS HF DE 10 MEGAWATTS SUR IMPEDANCE
REELLE, AVEC MODULATION DE FREQUENCE ET
D'AMPLITUDE.

R. Keller

LAUSANNE

June 1964

LRP 14-64

IMPULSIONS HF DE 10 MEGAWATTS SUR IMPEDANCE REELLE,
AVEC MODULATION DE FREQUENCE ET D'AMPLITUDE.

R. Keller

Abstract

High frequency wave packets are produced by discharging, successively, transmission lines which are connected in series by spark gaps. 10 MW of effective power at frequencies up to 10 MHz is obtained. The amplitude and the frequency can be programmed.

Lausanne

Impulsions HF de 10 mégawatts sur impédance réelle, avec
modulation de fréquence et d'amplitude.

R. KELLER

1.- Le principe du générateur à ligne.

On a souvent utilisé des circuits oscillants enclenchés au moyen d'éclateurs pour produire de la haute fréquence de grande puissance. Ces générateurs sont incommodes par le fait qu'ils produisent des trains d'ondes amortis dans la mesure où la puissance demandée est grande. En couplant une multitude de circuits oscillants à la manière d'une ligne de transmission, il est possible d'obtenir des trains d'ondes peu amortis avec une puissance effective du même ordre de grandeur que la puissance réactive. Un tel générateur a été décrit par E. Weibel⁽¹⁾.

Une autre variante de générateur à ligne a été développée, à la suite d'essais préliminaires entrepris par W. Millar⁽²⁾ et R. Keller⁽³⁾. Il a été établi que les pertes d'énergie dues aux éclateurs peuvent être réduites dans une large mesure si l'on superpose un courant continu supérieur à la valeur de crête du courant oscillatoire. Ainsi la tension d'arc des éclateurs reste toujours de même signe. Sans cet artifice la tension d'arc changerait de signe à chaque inversion de courant, ce qui occasionnerait une perte d'amplitude égale à 4 fois la tension d'arc en l'espace d'une période.

Dans le générateur à ligne décrit ici, les éclateurs sont connectés de telle façon que le courant ne s'inverse jamais. Le générateur se compose de deux parties : La partie droite (voir figure 1), que nous nommerons partie active, est formée d'un grand nombre de sections de ligne homogène, connectées successivement en série par l'intermédiaire

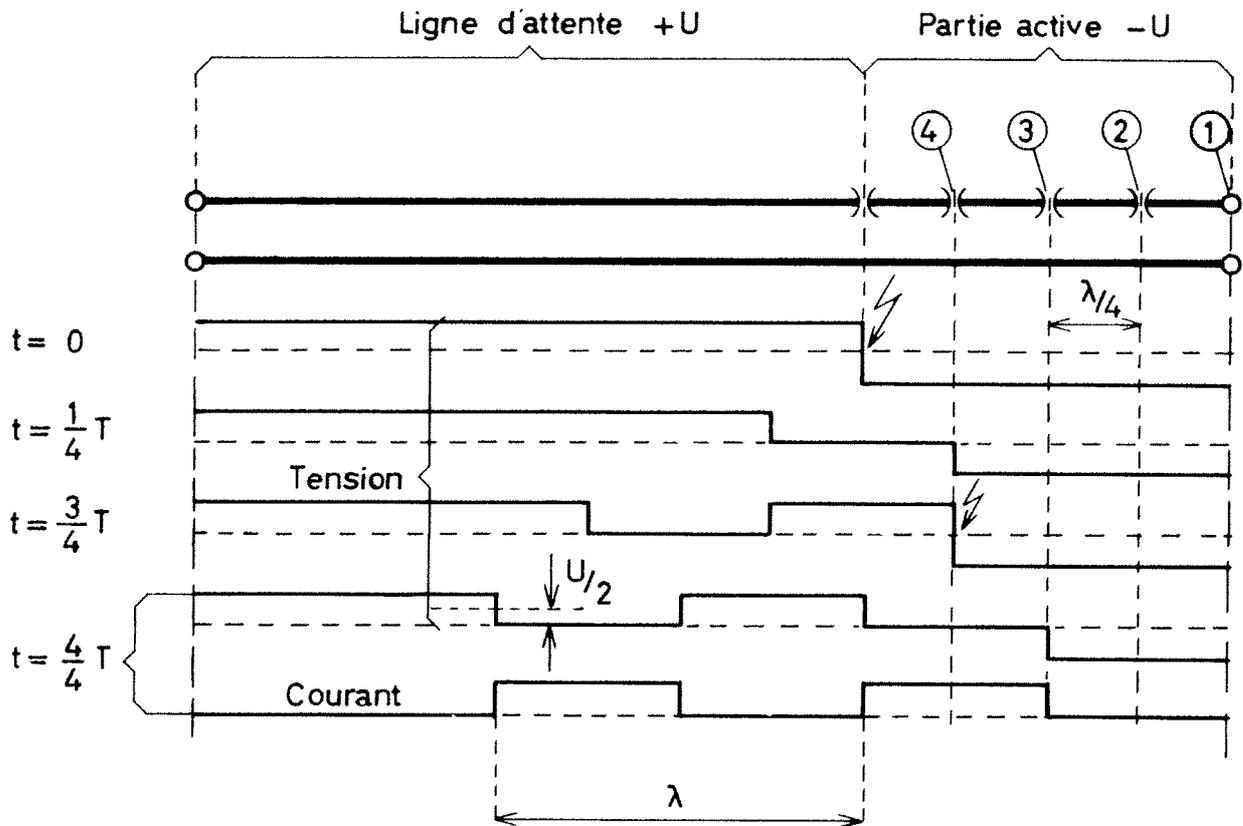


Fig. 1 : Formation de l'onde.

d'éclateurs. La partie gauche, que nous nommerons ligne d'attente, est formée d'une ligne ininterrompue. Les deux parties sont connectées ensemble au moyen d'un éclateur. (La ligne d'attente pourra être remplacée par un autre système, comme on le verra par la suite). Le générateur fonctionne de la façon suivante : Au départ les sections de la partie active sont toutes chargées à une tension égale, soit $-U$. La ligne d'attente est chargée à la même tension, mais de signe contraire, soit $+U$. Au temps $t = 0$ on enclenche le 1er éclateur, ce qui produit deux fronts d'onde progressant en sens opposés. L'un parvient au 2e éclateur après un temps $t = \frac{1}{4} T$, où T est la période de l'onde carrée qui sera produite. On laisse se réfléchir le front d'onde à l'endroit du 2e éclateur resté ouvert. Au temps $t = \frac{3}{4} T$ on enclenche le 2e éclateur, ce qui produit deux nouveaux fronts d'onde dont l'un parvient au 3e éclateur au temps $t = \frac{4}{4} T$. Puis on enclenche le 3e éclateur en $t = \frac{6}{4} T$, et ainsi de suite. Les éclateurs sont allumés successivement tous les $\frac{3}{4} T$. Un train

d'ondes carrées d'amplitude $U/2$, de période T , et dont les alternances sont d'égale durée, est ainsi produit et progresse vers la gauche. Le nombre de longueurs d'ondes est égal au nombre d'éclateurs. En consultant la figure 1 on remarque qu'une autre onde progresse vers la droite. C'est une onde continue (non oscillante) dont l'intensité de courant est égale à la valeur de crête de l'onde oscillante allant vers la gauche. La superposition des deux ondes ne donne rien d'autre qu'une succession d'impulsions carrées de même signe. Ainsi les éclateurs sont parcourus par un courant unidirectionnel.

Une fois les éclateurs allumés, on a la situation suivante : La ligne entière est parcourue par une onde progressive oscillatoire allant dans la direction de la ligne d'attente, et une onde continue allant dans la direction de la partie active. L'onde continue est réfléchiée, tandis que l'onde oscillatoire parvient à l'utilisateur branchée à l'extrémité de la ligne d'attente.

Le comportement du générateur à ligne est le même quel que soit le niveau moyen des tensions de charge. Seule la différence de tension entre la ligne d'attente et la partie active, lors de la charge, importe. Si l'on ne charge que la partie active, l'utilisateur peut être fait d'une simple résistance adaptée à l'impédance de la ligne et branchée directement à l'extrémité gauche de la ligne d'attente, celle-ci n'étant pas chargée. Ainsi l'onde est entièrement absorbée par l'utilisateur; en d'autres termes, il n'y a pas de réflexion. Les oscillogrammes de la figure 2 ont été pris dans les conditions ci-dessus.

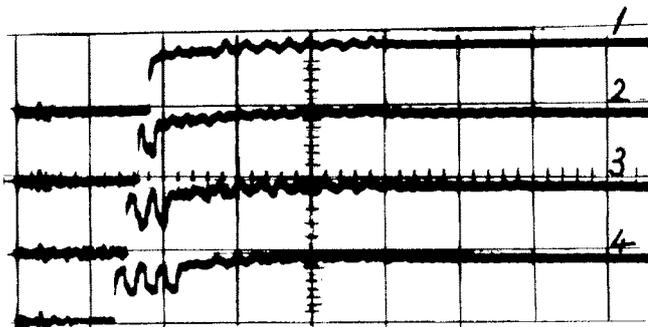


Fig. 2 : Tensions mesurées aux points indiqués par 1, 2, 3, 4, dans la fig. 1. Balayage $0,5 \mu\text{sec/cm}$.

La 1ère trace est la tension à l'extrémité droite de la partie active. Les 2e, 3e et 4e traces sont les tensions à l'endroit du dernier, de l'avant-dernier et du 3e éclateur à compter de la fin.

2.- L'adaptation de l'utilisateur.

Dans le cas réel, l'utilisateur sera rarement formé d'une résistance purement ohmique, au contraire, il sera formé d'une bobine de champ et d'un condensateur d'accord. Un tel système provoque toujours des signaux transitoires réfléchis. Si la ligne d'attente est trop courte, le signal réfléchi parvient aux éclateurs avant que ceux-ci soient déclenchés. Ainsi les tensions s'établissant aux éclateurs sont modifiées et il y a défaut d'allumage. On peut voir aisément que la ligne d'attente doit posséder une longueur au moins égale à 1,5 fois la longueur de la partie active. Dans l'expérience qui suit, la partie active est constituée de 8 sections de 11 m de long, et la ligne d'attente mesure 132 m. L'utilisateur est constitué d'un circuit LCR série (voir figure 3). R est égal à l'impédance de la ligne, soit $Z = 4,8 \Omega$. La capacité C vaut 2000 pF et la self L est ajustable. Le générateur produit un signal de 7 MHz.

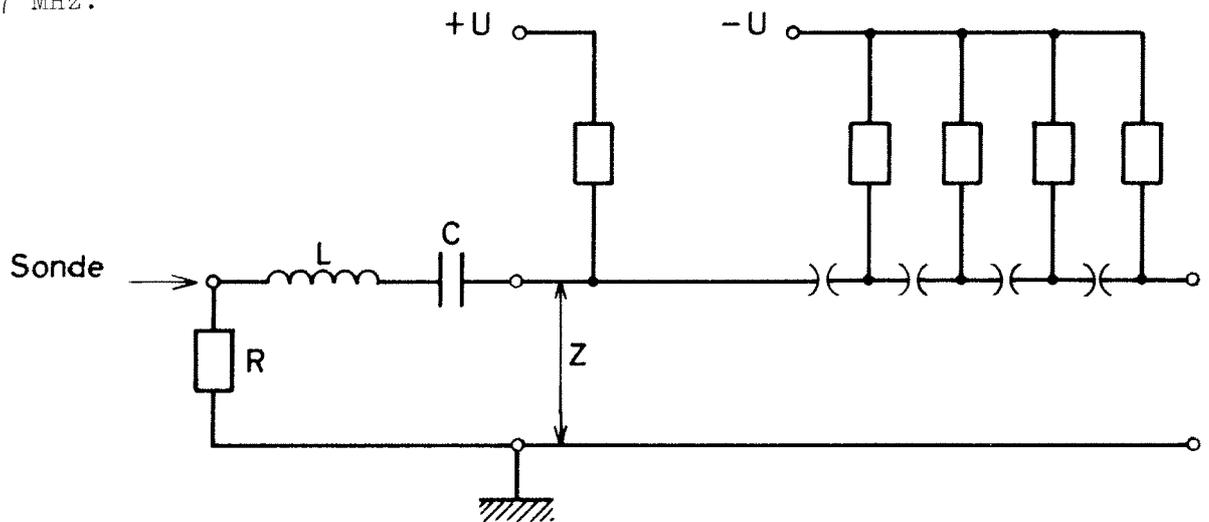


Figure 3

Fig. 3 : Un utilisateur LCR connecté à la ligne.

L'oscillogramme de la figure 4 indique la tension mesurée aux bornes de la résistance R. Chaque trace correspond à une fréquence d'accord différente. Le circuit est adapté lorsque sa fréquence de résonance est égale à la fréquence produite. La 3e trace correspond à ce cas, en effet il y a absence de réflexion sauf pour la perturbation due au phénomène transitoire. Toutes les autres traces montrent des trains d'ondes réfléchis. Les transitoires sont courtes parce que le facteur

de surtension du circuit est très bas, soit $Q = 2,4$.

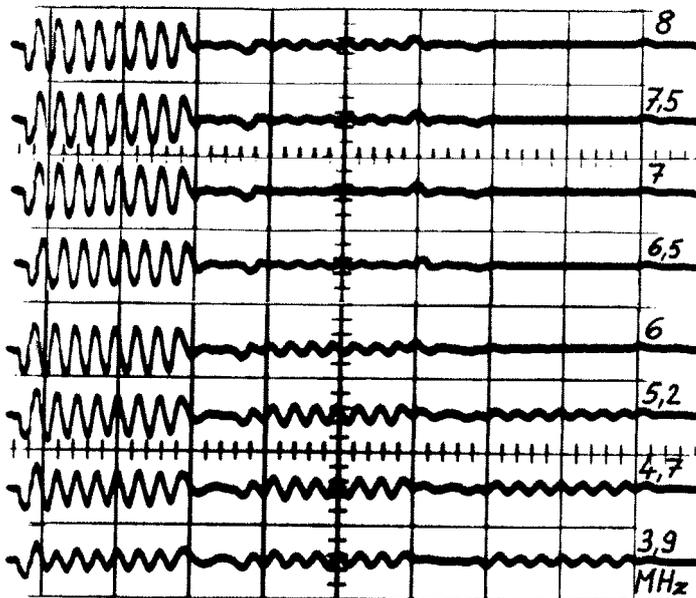


Fig. 4 : Tension mesurée sur la résistance R. Horizontal 0,5 $\mu\text{sec/cm}$, vertical 8kV/cm. Fréquence du générateur : 7 MHz. Les fréquences d'accord sont indiquées en marge.

Fig. 4

La ligne d'attente demande un travail de construction plus conséquent que celui de la partie active. En pratique on aimerait la supprimer, ce qui est possible à condition de réaliser un utilisateur dont l'impédance est réelle. La nature complexe de l'impédance de l'utilisateur peut souvent être compensée au moyen d'un circuit complémentaire. Par exemple un circuit LCR série sera compensé par un circuit LCR parallèle. Le schéma de la figure 5 indique la façon de procéder :

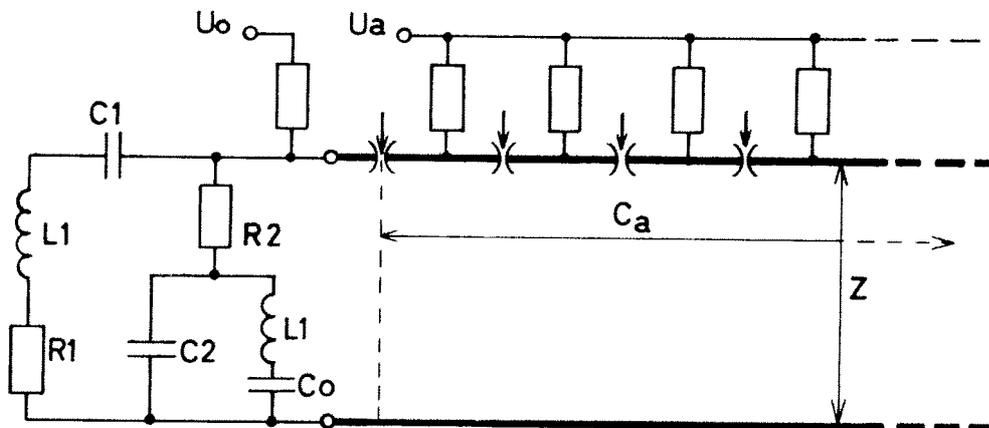


Figure 5

Fig. 5 : Adaptation d'une charge au générateur à ligne.

L'utilisateur est constitué par le circuit $C_1 L_1 R_1$ et la compensation est obtenue par le circuit $C_2 L_2 R_2$. On peut facilement démontrer que le système complet acquiert une impédance réelle égale à Z si les conditions suivantes sont remplies :

$$\begin{aligned}R_1 &= R_2 = Z \\L_1 C_1 &= L_2 C_2 \\Q &= \frac{1}{Z} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = Z \sqrt{\frac{C_2}{L_2}} \\C_0 &\gg C_2\end{aligned}$$

Le condensateur C_0 fournit maintenant la composante continue. Sa capacité doit être beaucoup plus grande que la capacité totale de la partie active.

L'essai du générateur avec circuit complémentaire est fait avec les valeurs numériques suivantes : La fréquence du générateur est fixée à 5,5 MHz. Les éléments de l'utilisateur sont : $R_1 = Z = 4,8 \Omega$, $C_1 = 2000 \text{ pF}$ et $L_1 = 410 \text{ nH}$, d'où $Q = 3$. Selon les conditions ci-dessus, le circuit complémentaire devrait être $R_2 = 4,8 \Omega$, $C_2 = 18000 \text{ pF}$ et $L_2 = 46 \text{ nH}$. Les conditions n'ont pas pu être remplies parce que le condensateur haute tension C_0 disponible à ce moment là avait une self propre de 140 nH au lieu de 46 nH (capacité 1,3 μF). L'essai présenté ici est donc fait avec un L_2 trois fois trop grand, et le condensateur C_2 est choisi 3 fois plus petit afin d'obtenir l'accord. Malgré la forte inexactitude de la compensation, le générateur fonctionne parfaitement. La figure 6 indique la tension de sortie du générateur. La séquence d'allumage reste correcte. D'autres essais avec une compensation encore moins bien réalisée ($C_1 = 400 \text{ pF}$; $Q = 15$) ont montré que le générateur fonctionne toujours correctement.

Il est donc permis d'affirmer que la correction de l'impédance de l'utilisateur ne demande pas à être précise.

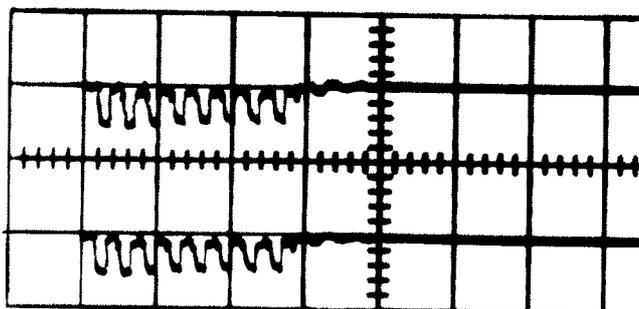


Fig. 6 : Tension de sortie du générateur adapté.
Horizontal 0,5 μ sec/cm.
Vertical 8 kV/cm.

Fig. 6

3.- Le bilan d'énergie.

Si l'on considère le système illustré par la figure 5, que l'on néglige l'énergie réactive emmagasinée dans les circuits L_1C_1 et L_2C_2 , et que l'on considère la condensateur C_0 comme étant infini, l'énergie totale délivrée par le générateur est donnée par

$$E_{\text{tot}} = 1/2 C_a (U_0 - U_a)^2 \quad (C_a \ll C_0)$$

C_a étant la capacité de la partie active. L'énergie de la composante fondamentale du train d'ondes carrées est dissipée dans la résistance R_1 , elle est de

$$E_{\text{ac}} = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{t}{Z} \cdot \left(\frac{U_0 - U_a}{4} \right)^2$$

où t est la durée du phénomène. On admet que l'état stationnaire est tout de suite atteint. t est égal à $4ZC_a$. (Le train d'onde formé occuperait une longueur égale à 4 fois la longueur de la partie active). Ainsi il vient :

$$E_{\text{ac}} = \frac{2}{\pi} C_a (U_0 - U_a)^2.$$

La différence $E_{\text{tot}} - E_{\text{ac}}$ est dissipée dans la résistance R_2 . C'est l'énergie de la composante continue et de toutes les harmoniques.

Soit encore l'énergie E_a emmagasinée dans la partie active avant la formation de l'onde :

$$E_a = \frac{1}{2} C_a U_a^2$$

Si maintenant on porte C_a et la partie active à des tensions égales et de signe contraire, c'est-à-dire si l'on fait $U_a = -U_0$, le rapport de l'énergie HF à l'énergie de la ligne devient

$$E_{ac}/E_a = 1,62.$$

Ce rapport, qui est en quelque sorte le rendement, est donc supérieur à l'unité. Le même rapport tendra vers l'infini dans le cas où la partie active n'est pas chargée au départ. (L'énergie provient uniquement du condensateur C_0 dans ce cas). Le générateur peut donc être considéré comme une sorte de hacheur (chopper).

En pratique on chargera le condensateur C_0 (respectivement la ligne d'attente si elle est nécessaire) et la partie active à des tensions égales, mais de signe contraire. Nommons dorénavant cette tension : la tension de charge $U = |U_a| = |U_0|$. Ainsi la puissance du générateur devient $P = E_{ac}/t$, soit

$$P = \frac{U^2}{5Z}.$$

4.- Construction d'une ligne.

La ligne est exécutée d'une façon très rudimentaire. Des feuilles d'aluminium pur de 0,4 mm d'épaisseur, alternées avec des couches isolantes, sont empilées les unes sur les autres à la manière indiquée par la figure 7. L'isolation est faite de planches de polystyrène spongieux (densité 0,06 gr/cm³), de 1 cm d'épaisseur. Pour assurer l'isolation, des feuilles de polyéthylène de 0,2 mm d'épaisseur sont encore intercalées entre chaque couche de polystyrène et d'aluminium.

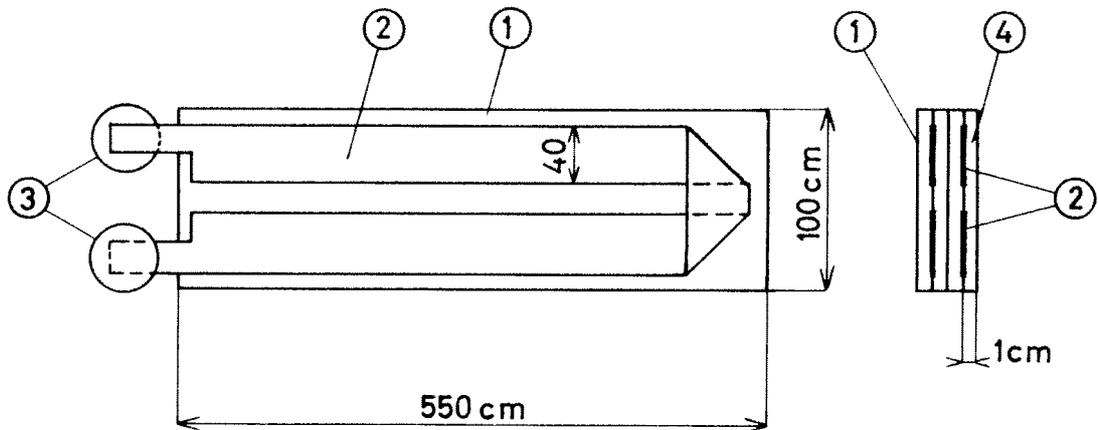


Figure 7

Fig. 7 : Construction du générateur

1. Conducteurs de masse reliés entre eux du côté des éclateurs.
2. Conducteurs intérieurs.
3. Eclateurs reliant deux conducteurs intérieurs voisins.
4. Isolation.

La connexion des 8 sections de la partie active se fait par l'intermédiaire d'éclateurs, tandis que les 12 sections de la ligne d'attente sont reliées directement entre elles. L'impédance mesurée est de 4,8 Ω . Certains essais ont été faits avec une tension de charge de 15 kV, d'où une puissance délivrée de

$$P = 9,5 \text{ mégawatts}$$

avec une fréquence de 6,4 MHz. La figure 8 montre le résultat d'un essai à 9,5 MW.

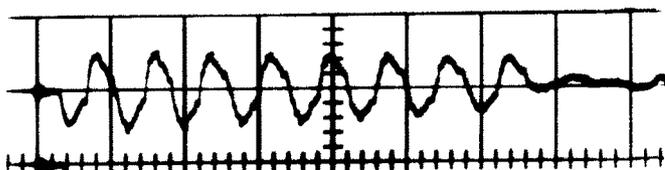


Fig. 8 : Signal de 9,5 MW mesuré sur une résistance de 4,8 Ω . Fréquence 6,4 MHz. Horizontal 0,2 $\mu\text{sec/cm}$. Vertical 19 kV/cm.

La sonde est branchée aux bornes de la résistance comme indiqué dans la figure 3. L'irrégularité du signal est due à l'inductivité inhérente à la résistance. On remarque un déclin d'amplitude qui est occasionné principalement par les pertes d'ionisation dans la matière

isolante spongieuse. Aussi a-t-on constaté une fatigue de l'isolation: après peu de temps des claquages ont eu lieu et il a fallu limiter la tension de charge à 11 kV, après réparation.

Les pertes ohmiques d'une ligne plane sont données par la formule

$$U = U_0 \exp(-\pi l / q\lambda)$$

qui exprime le déclin d'amplitude.

l est la distance parcourue par le train d'onde, λ sa longueur d'onde et q le facteur de qualité de la ligne. Ce facteur est égal à

$$q = h/d$$

où h est l'espacement des conducteurs et d l'épaisseur de peau exprimée par

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}}$$

ρ étant la résistivité du conducteur. Avec $\rho = 2,8 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$, on obtient $q = 300$. Le train d'ondes parcourt un trajet de 3 longueurs d'ondes dans la ligne d'attente composée de 12 sections, d'où $l/\lambda = 3$, ce qui fait une perte d'amplitude de 3 % à l'arrivée du train d'ondes. Lors du passage des 8 longueurs d'onde, il y a encore une perte d'amplitude de 8 %. En d'autres termes, la perte de puissance due à la résistance du métal est de 2 % par période.

Comme les pertes ohmiques sont essentiellement déterminées par l'espacement des conducteurs, il est donc avantageux de l'augmenter. Quant aux pertes par ionisation, un meilleur diélectrique s'impose. Il existe par exemple des céramiques possédant un facteur de qualité supérieur à 500, et dont la constante diélectrique est voisine de 100. La longueur d'onde, et partant, la ligne, serait par surcroît diminuée de 10 fois.

Le système de déclenchement des éclateurs est réalisé comme suit : Des lignes à retard d'une centaine d'ohms sont branchées capacitivement (avec 150 pF) à chaque extrémité des sections de la partie active. (Voir figure 9). Leurs longueurs sont ajustables au moyen de fiches de connexions.

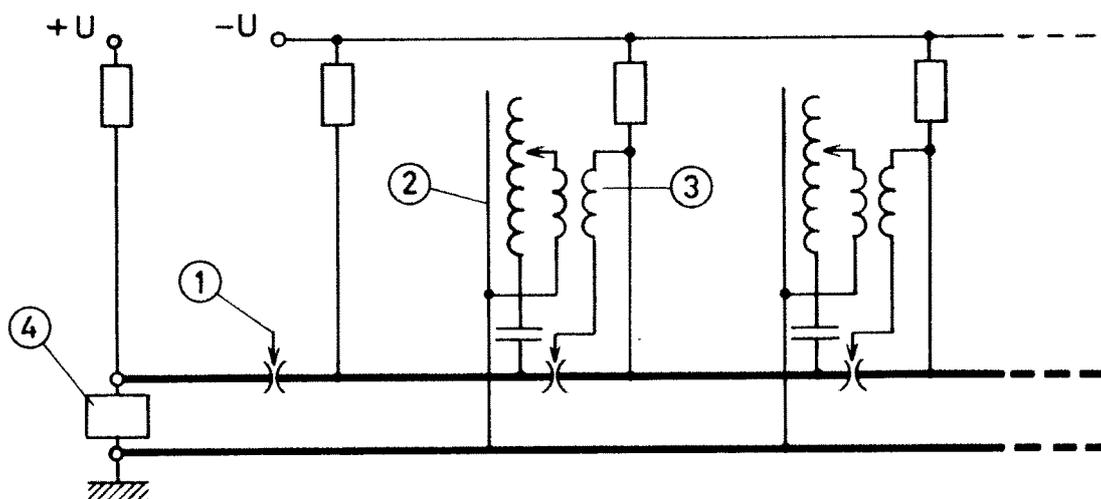


Figure 9

Fig. 9 : Système de déclenchement.

- 1. Trigger initial.- 2. Lignes à retard.
- 3. Transformateurs à air. - 4. Utilisateur.

Chaque impulsion ainsi retardée est dirigée par l'intermédiaire d'un transformateur vers l'électrode d'allumage de l'éclateur situé au même endroit que la ligne à retard respective. Les transformateurs, sans noyau de fer, inversent la polarité, ils possèdent une inductance de $10 \mu\text{H}$ et un rapport de transformation de 1:1. Pour des raisons d'encombrement on a avantage à confectionner les lignes à retard en bobinant simplement un fil bien isolé sur un tube de cuivre, au lieu d'utiliser les câbles du commerce.

Le "jitter" est négligeable bien que l'allumage se fasse par récurrence. Les oscillogrammes reproduits dans les figures 11 et 12 contiennent toutes 10 balayages superposés. On y distingue à peine un épaissement de trace. L'épaisseur des traces correspond à 5 nsec, donc le jitter cumulatif après 7 périodes est inférieur à $\pm 2,5$ nsec.

Les pertes de puissance occasionnées par le système de déclenchement sont très faibles, parce que les condensateurs de couplage sont petits. Seule la raideur des fronts d'ondes est atténuée, ce qui revient à dire que le système de déclenchement est alimenté par l'énergie des harmoniques.

5.- Les éclateurs.

Le bon fonctionnement du générateur à ligne est assuré à condition que la dispersion ne déforme pas trop le train d'onde. Cette condition est seulement remplie si l'inductivité additionnelle des éclateurs reste très en-dessous de celle d'une section de ligne. Des éclateurs avec une inductivité inférieure à 10 nH ont été développés. La figure 10 en donne la conception.

L'éclateur est caractérisé par la forme cylindrique de l'électrode d'allumage et de son logement dans l'une des électrodes principales. La tension de fonctionnement est déterminée avec une tolérance de 20% par la pression de remplissage d'azote. Cette dernière dépend de la durée pendant laquelle la tension apparaît aux électrodes. L'éclateur placé entre la partie active et la ligne d'attente, et qui est soumis à une tension constante, demande une pression de 50 % supérieure à celle des éclateurs de la partie active, et qui reçoivent la même tension, mais pendant une fraction de microseconde.

6.- Modulation d'amplitude et de fréquence.

Il faut maintenant considérer la tension d'arc ΔU des éclateurs. Si la tension de charge est U , le 1er éclateur est soumis à une tension $2 U$. Lors de l'enclenchement du 1er éclateur un front d'onde de valeur $U - \frac{\Delta U}{2}$ progresse vers l'éclateur suivant. Après réflexion à l'endroit du 2e éclateur le saut de tension se trouve doublé, soit $2 U - \Delta U$. La tension s'établissant au 2e éclateur est donc de $2 U - \Delta U$. Il en ressort qu'à chaque nouvelle période la tension entre pointes se trouve diminuée de ΔU . La tension d'arc étant de l'ordre de 100 Volts, on aura une perte linéaire d'amplitude égale à 50 Volts par période.

L'atténuation causée par la tension d'arc ainsi que par les pertes ohmiques et diélectriques peut être compensée si l'on charge les sections de la ligne à des tensions allant en croissant. D'une façon plus générale, on peut charger les différentes sections à des valeurs de tension quelconques et bien déterminées. Ainsi on obtient une modulation d'amplitude.

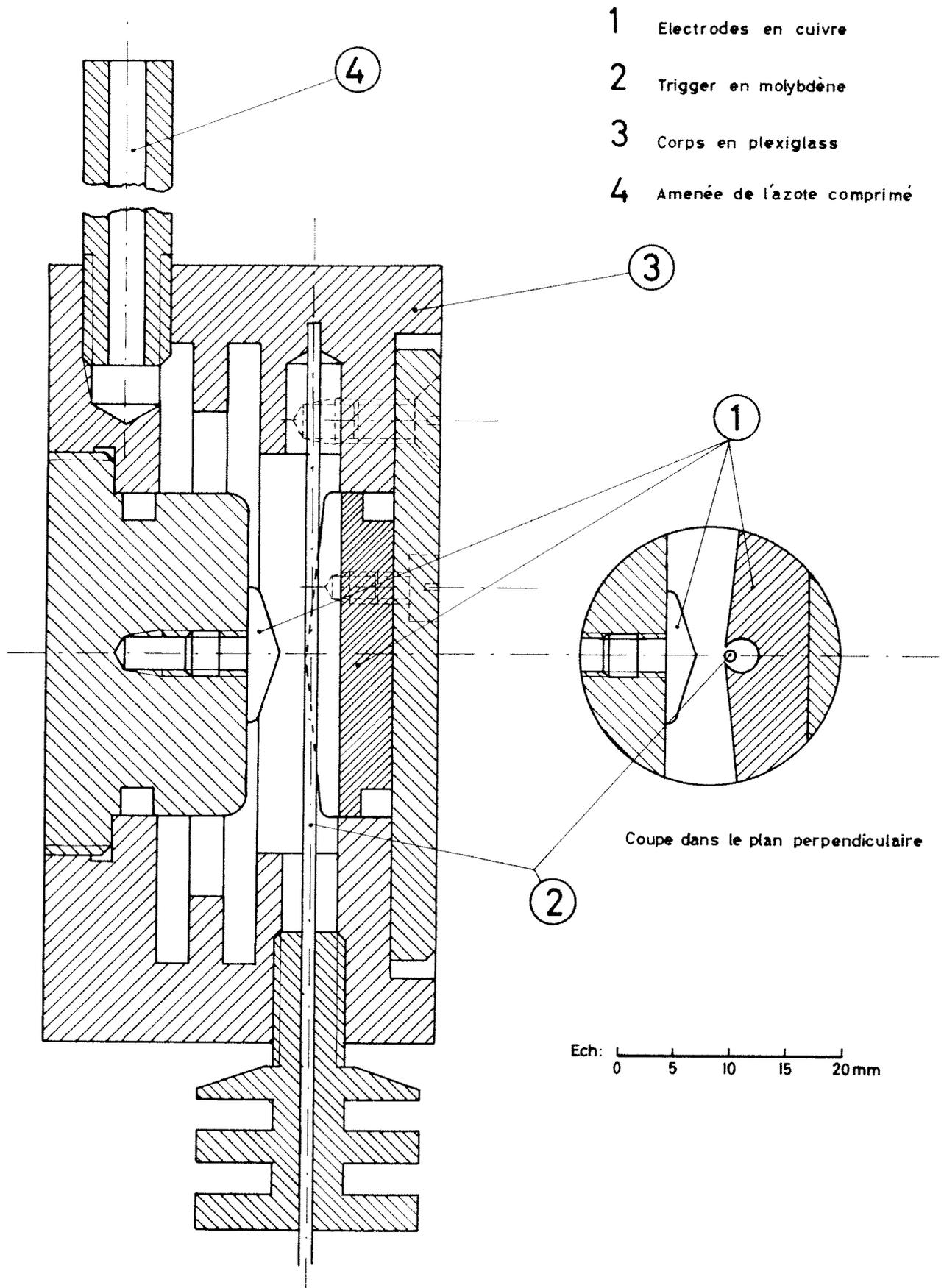


Figure 10 : Eclateur

De façon analogue, il est aisé de déclencher les éclateurs à un rythme programmé d'avance. Ainsi on obtient une modulation de fréquence. Pour ce faire, il suffit de fixer le délai des lignes à retard selon une séquence choisie d'avance. Il s'ensuit que les alternances positives et négatives de l'onde engendrée ne seront plus d'égale durée. Cela a comme effet de diminuer l'amplitude de la composante fondamentale. Celle-ci est proportionnelle à $\sin(\frac{\pi f}{2f_0})$ où f_0 désigne la fréquence pour laquelle les deux alternances sont égales. Pour une plage de fréquence allant du simple au double, la diminution de puissance est de 25 % aux deux extrêmes.

Voici pour terminer deux exemples de modulations combinées d'amplitude et de fréquence. La modulation d'amplitude est déterminée par les tensions de charge suivantes : ligne d'attente : 0; sections de la partie active : -5; -7,4; -7,6; -8,5; -10; -11,5; -13 kV. Le nombre de périodes engendrées est de 7. La fréquence est de 5 MHz au départ, puis elle augmente régulièrement jusqu'à 7,5 MHz. Le condensateur C_1 de l'utilisateur est de 2000 pF. On mesure le courant au moyen d'une sonde magnétique placée au voisinage de la bobine L_1 .

Dans la figure 11 l'utilisateur est accordé sur 7 MHz et le facteur de surtension Q est de 2,4. On a le cas d'une amplitude et d'une fréquence croissante.

Dans la figure 12 l'utilisateur est accordé sur 4,7 MHz et le facteur de surtension est de 3,5. Ici la fréquence varie dans les mêmes limites. Au début du phénomène le générateur produit une fréquence voisine de la résonance, ce qui provoque une grande surtension. Ensuite

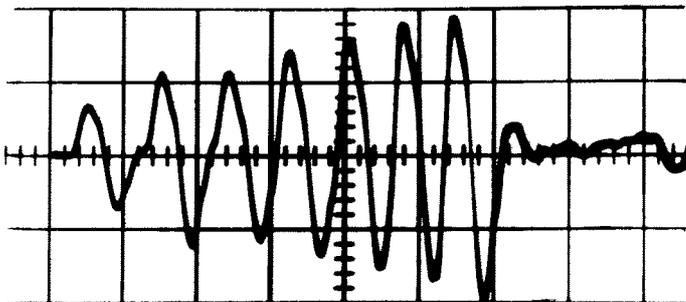


Fig. 11 : Modulation de fréquence. La fréquence passe de 5 à 7,5 MHz. Circuit accordé sur 7 MHz. Horizontal 0,2 μ sec/cm. Vertical 350 A/cm. 10 balayages superposés. Jitter \pm 2,5 nsec.

Fig. 11

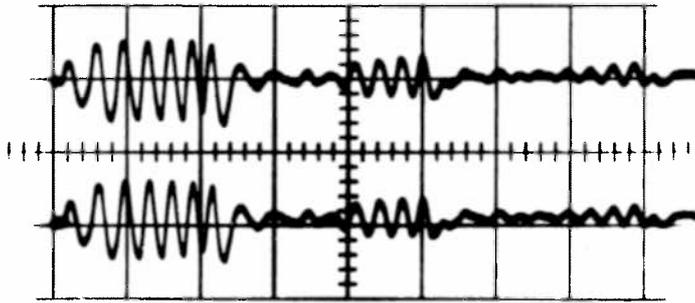


Fig. 12 : Modulation de fréquence. La fréquence passe de 5 à 7,5 MHz. Circuit accordé sur 4,7 MHz. Horizontal 0,5 μ sec/cm. Vertical 800 A/cm. Jitter \pm 2,5 nsec.

Fig. 12

la fréquence produite s'écarte de la résonance, mais l'augmentation de puissance compense la diminution d'amplitude qu'on aurait à cause du désaccord. Ainsi l'amplitude reste sensiblement constante. Cette dernière expérience montre encore une fois les réflexions causées par un circuit non adapté. Le second train d'onde, visible sur la figure 12, n'est rien d'autre que le passage d'un signal réfléchi à l'autre extrémité de la ligne. Son amplitude est petite au début parce que le circuit est assez bien accordé, c'est-à-dire adapté. Puis le signal réfléchi augmente en intensité parce que la désadaptation s'accroît en raison de la variation de fréquence.

Références

- (1) E.S. Weibel : High power rf pulse generator
Rev. Sc. Instr. 35, 173 (1964)
- (2) W. Millar : Long pulses of high frequency oscillations at high power levels - Colloque sur les problèmes techniques particuliers aux recherches sur la fusion contrôlée. Fontenay-aux-Roses, avril 1962
- (3) R. Keller : Systèmes oscillants peu amortis, commutés avec un éclateur de faibles pertes. Laboratoire de recherches sur la physique des plasmas. Rapport LRP 1-63 (1963), Lausanne.