**Zeitschrift:** Helvetica Physica Acta

**Band:** 38 (1965)

**Heft:** III

**Artikel:** Haute fréquence de grande puissance obtenue au moyen d'un générateur à ligne

**Autor:** Keller, R.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-113598

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 12.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Haute fréquence de grande puissance obtenue au moyen d'un générateur à ligne

par **R. Keller**

Laboratoire de Recherches sur la Physique des Plasmas, Lausanne

(11. II. 65)

*Abstract:* High frequency wave packets of 5 MHz are produced by discharging, successively, transmission lines which are connected in series with spark gaps. Means of modulating the frequency and the amplitude up to powers of several tens of megawatts are described.

## 1. Principe du générateur à ligne

Certaines expériences relatives au chauffage, au confinement ou à la stabilisation des plasmas nécessitent des impulsions de haute fréquence dont les puissances effectives sont de l'ordre de plusieurs dizaines ou même des centaines de MW, et dont la fréquence est de quelques MHz. De telles puissances ont souvent été obtenues par décharges de condensateurs, mais avec l'inconvénient de produire des trains d'ondes fortement amortis.

Le générateur à ligne décrit dans ce travail est un prototype démontrant que l'on peut aisément produire des trains d'ondes entretenues de puissance extrême et de fréquence convenable. Il est également possible de moduler l'amplitude ainsi que la fréquence. D'autres variantes ont été décrites par E. WEIBEL[1]) et A. LIETTI[2]).

Notre générateur est constitué de deux composantes: 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 d'éclateurs. La partie gauche, que nous nommerons ligne d'attente, est formée d'une ligne ininterrompue de même longueur que la partie active. Les deux composantes sont connectées ensemble au moyen d'un éclateur. (La ligne d'attente peut être remplacée par un autre système, comme nous le verrons 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 $t = (1/4)\,T$, ou $T$ 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 $t = (3/4)\,T$ on enclenche le 2e éclateur, ce qui produit deux nouveaux fronts d'onde dont l'un parvient au 3e éclateur au temps $t = (4/4)\,T$. Puis on enclenche le 3e éclateur en

$t = 6/4\ T$, et ainsi de suite. Les éclateurs sont allumés successivement tous les $3/4\ T$. Ainsi on obtient finalement un train d'ondes carrées d'amplitude $U/2$, de période $T$, dont les alternances sont d'égale durée et qui progresse vers la gauche. Le nombre de périodes 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 qui ne change jamais de sens.

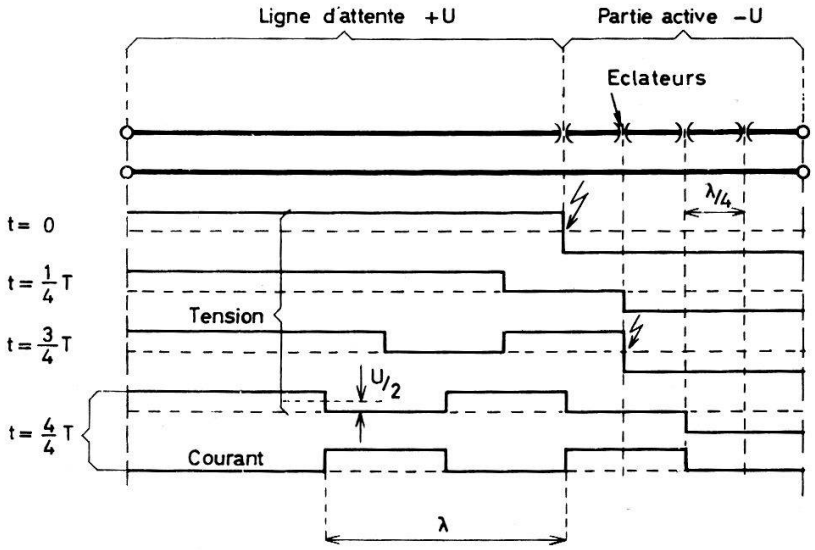


Fig. 1
Formation de l'onde

Le fait que les éclateurs sont parcourus par un courant unidirectionnel est un point essentiel. Diverses mesures, ainsi que les essais préliminaires entrepris par W. MILLAR[3]) et R. KELLER[4]), ont montré que les éclateurs possèdent une tension d'arc pratiquement indépendante du courant et de la durée des impulsions entrant en ligne de compte ici. La tension d'arc est de 250 V environ. Or un éclateur branché dans un circuit oscillant occasionne une chute de tension égale à deux fois la tension d'arc lors de chaque inversion de courant. L'amplitude diminue par conséquent de 1000 V par période. Dans notre système de génération d'ondes la situation est beaucoup plus favorable. Analysons encore une fois la formation de l'onde, mais en considérant cette fois la tension d'arc $\Delta U$: 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 $U - \Delta U/2$ progresse vers l'éclateur suivant. Après réflexion à l'endroit du 2e éclateur, le saut de tension se trouve doublé, ainsi la tension s'établissant au 2e éclateur est de $2\ U - \Delta U$. Il en ressort qu'à chaque nouvelle période l'amplitude $U/2$ se trouve diminuée de $\Delta U/4$. Notre système est ainsi tributaire des pertes dues aux éclateurs à raison de 62 V par période. Ces pertes sont 8 fois plus faibles, comparées aux pertes d'un système où le courant est oscillatoire. (Il faut comparer la puissance de l'onde carrée de notre générateur à la puissance de l'onde sinusoïdale d'un circuit oscillant.)

## 2. Modulation d'amplitude et de fréquence

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

De façon analogue, il est aisé de déclencher les éclateurs à un rythme programmé d'avance. Ainsi on obtient une modulation de fréquence.

La figure 2 montre un exemple de modulation combinée d'amplitude et de fréquence. Le signal enregistré est le courant d'un circuit oscillant $LCR$ série, alimenté par le générateur. Les données sont les suivantes: $C = 2000$ pF; $R = 4{,}6\ \Omega$, fréquence d'accord $= 7$ MHz, facteur de surtension $Q = 2{,}5$. La fréquence du générateur passe de 5 à 7,5 MHz en l'espace de 7 périodes. L'augmentation de l'amplitude est un peu accentuée par le fait que la fréquence du générateur s'approche de l'accord au cours du phénomène, mais l'effet est petit, vu la faible valeur du facteur $Q$.

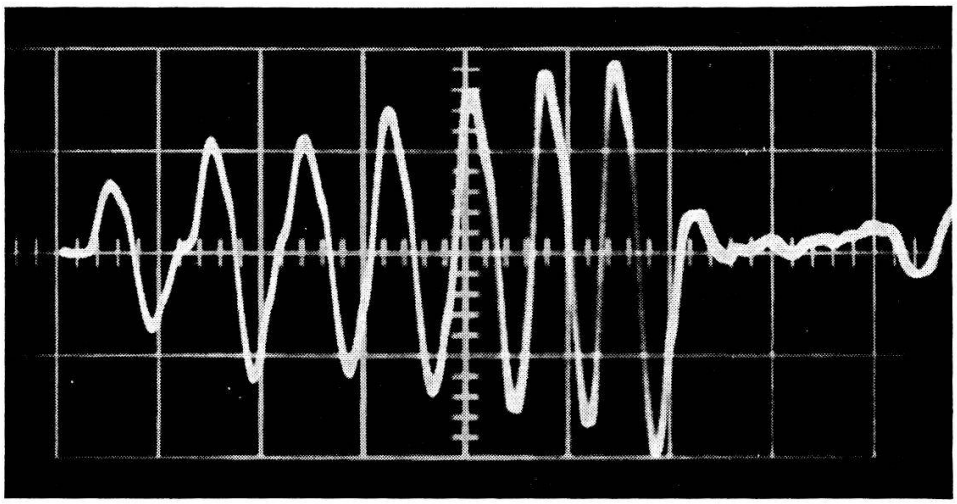

Fig. 2
Modulation de fréquence et d'amplitude.
La fréquence passe de 5 à 7,5 MHz. Horizontal: 0,2 μsec/div.; Vertical: 350 A/div. 10 balayages superposés, jitter $\pm$ 2,5 nsec.

Le système de déclenchement, décrit au paragraphe 4, présente très peu de «jitter». L'oscillogramme de la figure 2 contient 10 balayages superposés. D'après l'épaississement de la trace on en déduit un jitter cumulatif de $\pm$ 2,5 nsec après 7 périodes.

La puissance utile du générateur est donnée par la composante fondamentale de l'onde carrée. Elle est maximale pour la fréquence à laquelle les durées des deux alternances sont égales. Si $f_0$ est la fréquence optimale et $f$ la fréquence engendrée, la puissance utile est donnée par

$$P = \frac{2\,U^2}{\pi^2\,Z}\left[\sin\frac{\pi f}{2 f_0}\right]^2$$

où $Z$ est l'impédance de la ligne.

### 3. L'adaptation de l'utilisateur

En pratique l'utilisateur se compose d'une bobine de champ et d'un condensateur d'accord, ou bien d'un circuit équivalent contenant le chemin inductif et résistif d'un plasma. Un tel système provoque toujours des signaux transitoires réfléchis. Si la ligne d'attente est trop courte, les signaux réfléchis parviennent aux éclateurs avant qu'ils ne soient allumés et en perturbent l'enclenchement. Il est souvent possible de corriger l'impédance complexe de l'utilisateur au moyen d'un circuit complémentaire faisant du tout une impédance égale à celle de la ligne. Ainsi la ligne d'attente devient superflue. Le schéma de la figure 3 indique la façon de procéder. L'utilisateur est

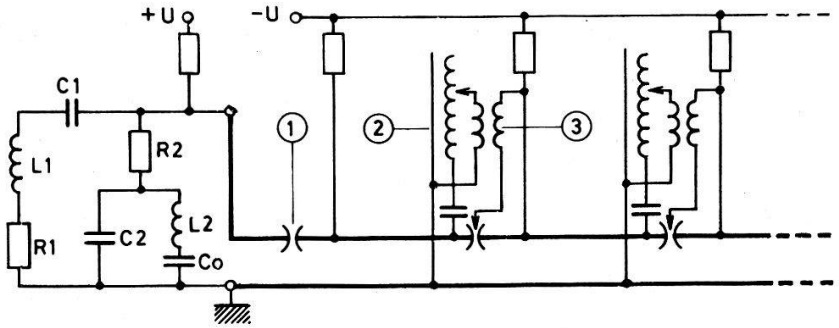


Fig. 3
Adaptation d'une charge et système de déclenchement.
1. Trigger initial; 2. Lignes à retard; 3. Transformateurs inverseurs

formé par le circuit $L_1\, C_1\, R_1$ et la compensation est obtenue par le circuit complémentaire $L_2\, C_2\, R_2$. Le système complet acquiert une impédance réelle $Z$ si les conditions suivantes sont remplies:

$$R_1 = R_2 = Z$$

$$L_1\, C_1 = L_2\, C_2$$

$$Q = \frac{1}{Z}\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = Z\sqrt{\frac{C_2}{L_2}}$$

$$C_0 \gg C_2\,.$$

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

Comme exemple concret prenons un de nos essais, décrit au paragraphe 5 *a*, soit: $f = 4{,}7$ MHz; $C_1 = 825$ pF; $Z = 4{,}6\,\Omega$. Les éléments du circuit complémentaire deviendraient, selon les conditions ci-dessus:

$$L_2 = 18{,}2\text{ nH}; \quad C_2 = 61\,000\text{ pF}\,.$$

En pratique il est difficile de trouver un condensateur pour haute tension possédant une self aussi petite que 18 nH. Heureusement l'expérience a montré qu'une forte digression aux conditions ci-dessus est permise. Seule la condition d'accord est néces-

saire. Le signal de la figure 4 a été obtenu avec une ligne à 20 sections et un circuit de compensation formé par un condensateur de haute tension $C_0 = 3{,}5\ \mu F$ possédant une self propre de 110 nH. L'accord était obtenu avec un condensateur $C_2$ de 10 000 pF.

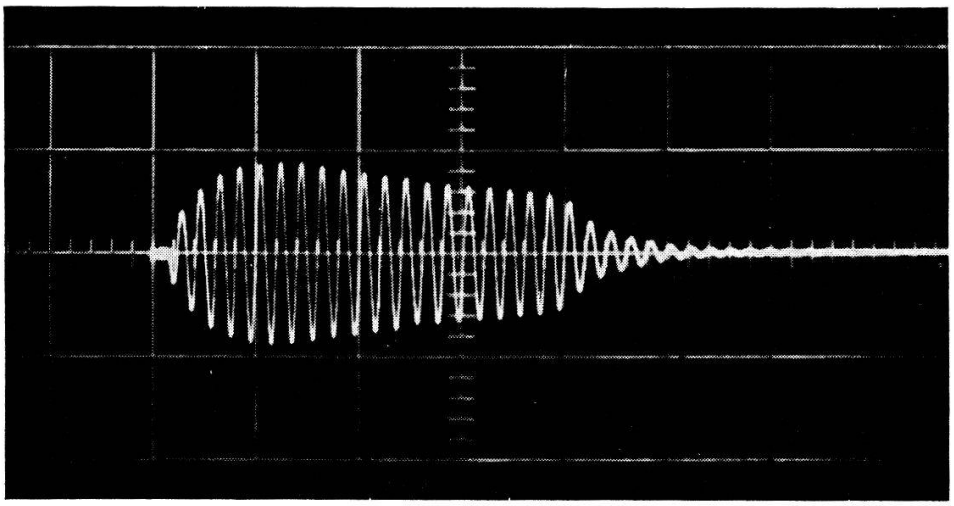

Fig. 4
Train d'ondes d'un générateur à 20 sections.
Fréquence: 4,7 MHz; Horizontal: 1,03 μsec/div.; Vertical: 7 kV/div. La tension est mesurée à la résistance $R_1$

Le choix entre les alternatives, ligne d'attente ou circuit de compensation est dicté par la nature de l'utilisateur. Le circuit de compensation est plus simple, moins encombrant et moins onéreux. Mais il n'est pas applicable si les paramètres du plasma varient fortement en impédance et en fréquence de résonance. De plus le grand condensateur $C_0$ introduit un certain danger pour la ligne ainsi que pour l'utilisateur, danger inexistant dans le cas d'une ligne d'attente. Le générateur avec ligne d'attente présente au contraire le grand avantage d'être indépendant de la nature de l'utilisateur. Notamment la modulation de fréquence est toujours possible, et les problèmes d'adaptation de la charge sont simplifiés du fait que l'on peut mesurer le taux d'onde stationnaite sur la ligne d'attente (contrôle facile des réflexions).

## 4. Construction de la ligne, du système de déclenchement et des éclateurs

Le générateur est constitué de feuilles d'aluminium de 0,4 mm d'épaisseur, formant alternativement le conducteur haute tension et le conducteur terre, à la manière indiquée par la figure 5. Les feuilles sont séparées par des cales en plastique. Pour assurer l'isolation, des feuilles d'«isodur» de 1 mm d'épaisseur recouvrent de chaque côté les conducteurs haute tension. La connexion des 20 sections de la partie active se fait par l'intermédiaire de 19 éclateurs. Un 20e éclateur relie la partie active à l'utilisateur et au circuit de compensation.

Le déclenchement des éclateurs se fait par récurrence: Des lignes à retard d'une centaine d'ohms sont connectées aux extrémités des sections de la partie active (voir figure 3) par l'intermédiaire d'un condensateur de 300 pF. Les retards sont ajustables

au moyen de fiches de connexions. 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 inversent la polarité, leur inductance est de 10 $\mu$H et leur rapport de transformation est de 1:1.

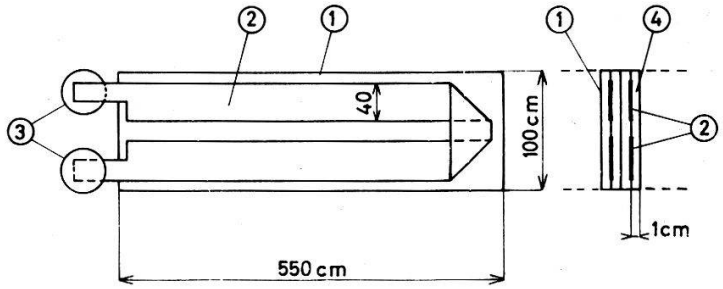


Fig. 5
Construction d'un générateur.
1. Conducteurs terre reliés entre eux; 2. Conducteurs haute tension; 3. Eclateurs; 4. Isolation

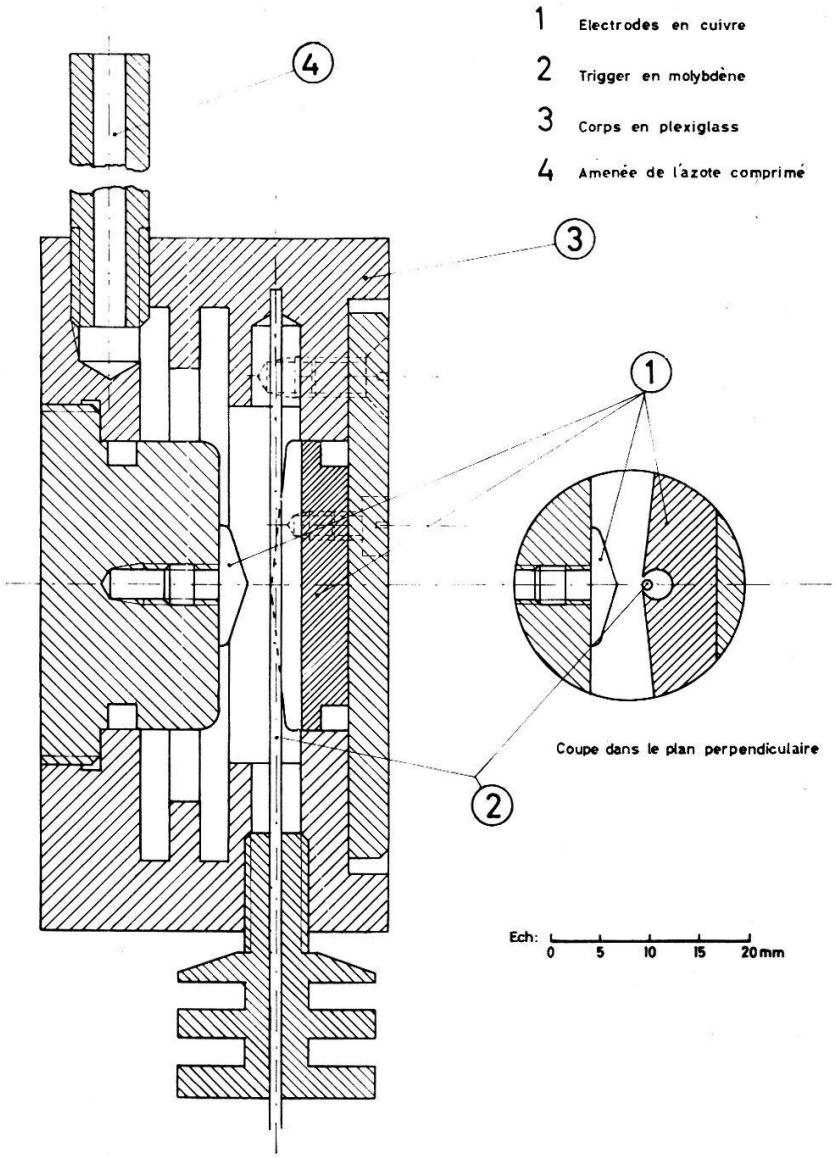


Fig. 6

Pour des raisons d'encombrement, on a avantage à confectionner les lignes à retard en bobinant simplement un fil isolé sur un tube de cuivre, au lieu d'utiliser des câbles standards.

Le «jitter» est négligeable, comme nous l'avons déjà fait remarquer. Tous les oscillogrammes montrés dans ce travail contiennent plusieurs traces superposées.

Le bon fonctionnement du générateur à ligne n'est assuré que si l'inductivité des éclateurs est très inférieure à celle d'une section de ligne. Des éclateurs avec une inductivité inférieure à 10 nH ont été développés. La figure 6 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 fixée par la pression de remplissage d'azote, avec une tolérance de $\pm$ 10%. La pression 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, qui recoivent la même tension, mais pendant une fraction de microseconde.

## 5. Mesure de la puissance

Le dispositif permettant de mesurer la puissance de la haute fréquence avec une certaine précision est indiqué dans la figure 7 dessinée à l'échelle. On mesure la puissance de deux manières indépendantes:

1. Par la mesure de la tension $U_R$. La résistance $R_1$ possède la forme d'un cylindre creux, ainsi la mesure de la tension peut se faire sans induction depuis l'intérieur. (Le champ électrique pénètre entièrement dans la matière résistive, donc pas d'erreur due à l'effet de peau).

2. Par la mesure de la tension $U_c$ au condensateur. Les corrections dues à la self propre du condensateur et aux capacités de fuite ont été considérées. L'impédance vue au point de mesure $U_c$ est égale à $Z_{tot} = 1/\omega(C_1 + \Delta C) - \omega \Delta L$. On obtient ainsi le courant $I = U_c/Z_{tot}$ et la puissance est donnée par $P = I^2 R_1$. Les deux résultats de mesures sont concordants à $\pm$ 5% près.

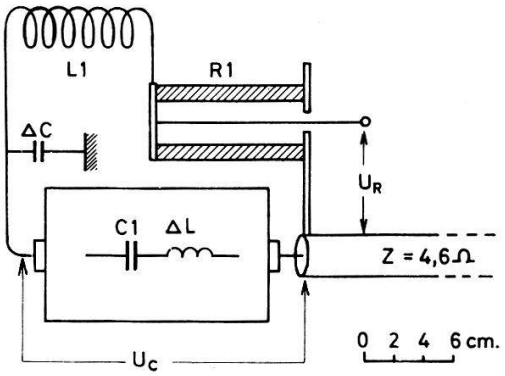


Fig. 7
Dispositif pour la mesure de la puissance

### *5a. Générateur à 20 sections*

Le circuit de mesure est connecté au générateur par l'intermédiaire d'un câble de 10 mètres, constitué d'une torche de 11 câbles $RG - 8\,A/U$ de 50 Ω. La figure 4,

citée au paragraphe 3, montre la tension $U_R$ obtenue dans les conditions suivantes:

Fréquence nominale du générateur $f_0 = 7$ MHz.
Fréquence produite $f = 4{,}7$ MHz.
Impédance $Z = 4{,}6\ \Omega = R_1$.
$C_1 = 825$ pF, $Z_{tot} = 39\ \Omega$.
Tension de charge = 15 kV.

La puissance mesurée s'élève à 3,8 MW. Or la puissance devrait être théoriquement de 7,3 MW.

Les pertes sont principalement dues aux câbles $R\,G - 8\,A/U$ et au système d'allumage des éclateurs.

### *5b. Deux générateurs en parallèle, de 10 sections chacun*

Grâce à un système d'allumage commun aux deux générateurs, le synchronisme est assuré et il est possible de les brancher en parallèle. Chaque générateur possède son propre circuit de compensation. L'adaptation a lieu pour une résistance $R_1$ égale

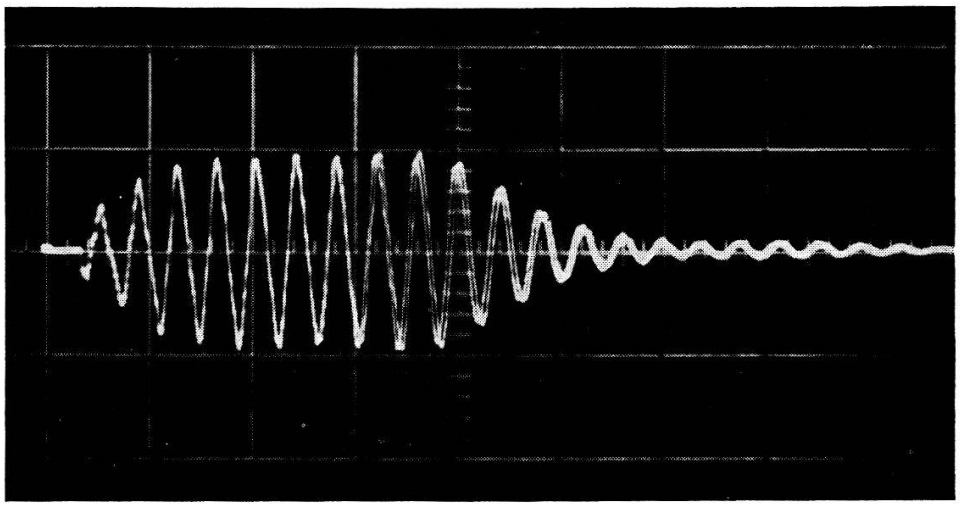

Fig. 8
Train d'ondes de 13 MW.
Fréquence: 5 MHz; Horizontal: 0,515 μsec/div.; Vertical: 65 kV/div. La tension est mesurée au condensateur d'accord

à la moitié de l'impédance de chaque générateur. La self d'accord est deux fois plus petite et le condensateur $C_1$ est deux fois plus grand qu'auparavant. La figure 8 reproduit la tension $U_c$ obtenue dans les conditions suivantes:

Fréquence nominale du générateur $f_0 = 7$ MHz.
Fréquence produite $f = 5{,}05$ MHz.
Impédance du générateur double $Z = 2{,}3\ \Omega$.
Résistance $R_1 = 2{,}4\ \Omega$.
Impédance au point de mesure = 18,5 Ω.
Tension de charge = 16 kV.

La puissance mesurée est de 13 MW $\pm$ 5%. Or celle-ci devrait être théoriquement de 18,3 MW, ce qui fait un rendement de 71%. Différentes causes de pertes peuvent être mentionnées; voici les principales, en pourcents par période: Système d'allumage: 1,2%; pertes ohmiques de la ligne: 0,9%; circuits de compensation: 0,5%; éclateurs: 1,5%; total = 4,1%. A la septième période, où la puissance mesurée atteint son maximum, cela fait $(1 - 0{,}041)^7 = 0{,}746$.

## 6. Suggestions pour d'autres variantes

L'expérience a montré que le générateur peut foncitonner avec la polarité inverse. Cette particularité permet de connecter deux générateurs en push-pull.

Des champs tournants pourraient être aisément produits au moyen de deux générateurs à ligne déphasés de 90°.

Il est certian que beaucoup d'expériences demanderont des trains d'ondes de longue durée. Pour ce faire, nous entrevoyons la possibilité de mettre plusieurs générateurs de grandeur raisonnable en opération cyclique. Cela n'est évidemment possible que si le temps de recyclage est supérieur au temps de déionisation des éclateurs.

Pour terminer, nous mentionnons la réalisation d'un générateur à ligne avec lequel nous avons atteint une puissance de 40 MW. La construction est différente en ce sens que les sections de ligne ne sont plus homogènes, mais au contraire constituées d'éléments concentrés $L\ C$, dont les condensateurs sont du type courant, en céramique.

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Recherches sur la Physique des Plasmas, financé par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique.

## Références

1) E. S. Weibel, *High power RF pulse generator*, Rev. Sc. Instr. *35*, 173 (1964).
2) A. Lietti, *30–40 Megawatts RF Line Pulse Generator*, Rev. Sc. Instr. *36*, 13 (1965).
3) 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).
4) 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.