

April 1963

LRP 5-63

BANC DE CONDENSATEURS POUR THETA PINCH

J.P. Perotti

Abstract

The paper describes the realization of circuits capable of producing nearly rectangular current pulses of 2 μ s rise time, 15 μ s duration and 800 kA.

Lausanne

Banc de condensateurs pour Theta Pinch

J.P. PEROTTI

Principe

Il est possible de produire des impulsions de courant approchant la forme rectangulaire en déchargeant une ligne de retard sur son impédance caractéristique. Cependant, il est difficile de réaliser une telle ligne artificielle au moyen de selfs et de capacités et d'obtenir une forme d'impulsion ne s'écartant pas trop de la forme théorique escomptée.

Guillemin (1) a montré qu'une ligne de transmission sans perte pouvait engendrer une impulsion à temps de montée infiniment court, mais qu'une telle discontinuité ne pouvait pas être produite par un circuit à constantes L et C localisées. Le remède consiste à donner à l'impulsion un temps de montée et de chute fini, fraction α de la largeur T de l'impulsion. Les ondulations du palier horizontal peuvent être minimisées en prenant un nombre de sections suffisamment grand.

La forme d'onde $f(t)$ de la fig. 1 peut être représentée

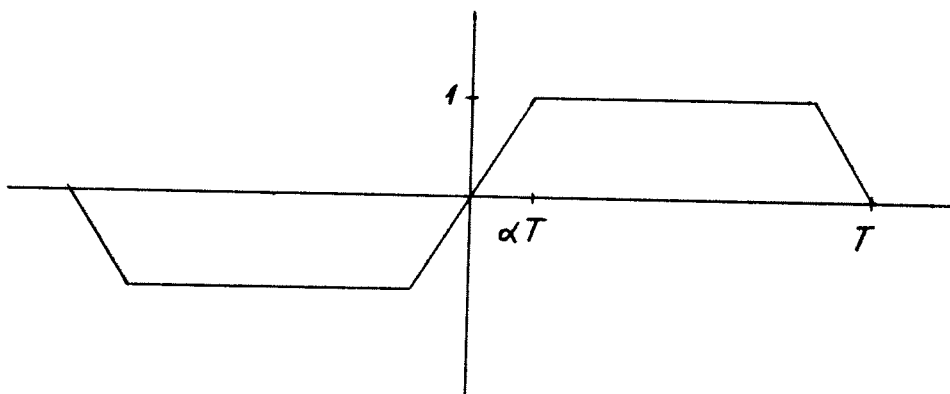


Figure 1

par la série de Fourier :

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{nt}{\pi}\right) \quad (1)$$

où les coefficients b_n sont donnés par :

$$b_n = \frac{8 (1 - \cos n \pi \alpha)}{n^3 \pi^3 \alpha^2} \quad \text{où } n \text{ est un nombre impair.} \quad (2)$$

Ces résultats suggèrent la synthèse de cette onde par des circuits résonants en parallèle (fig. 2)

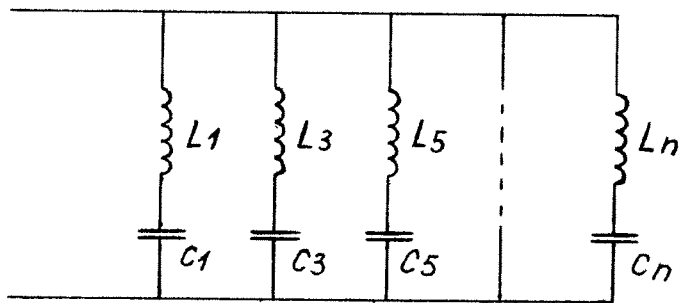


Figure 2

En effet, la décharge de ce réseau dans un court-circuit produit un courant :

$$I = V \sum_1^N \sqrt{\frac{C_n}{L_n}} \sin \sqrt{L_n C_n} t \quad (3)$$

Si l'on demande $I = \frac{V}{Z} f(t)$, on obtient les valeurs L_n et C_n par comparaison des coefficients dans les équations (1) et (3) :

$$L_n = \frac{Z T}{n \pi b_n} \quad C_n = \frac{T b_n}{n \pi Z} \quad (4)$$

L'impédance Z , la durée T et α sont à choisir.

L'expérience du Theta-pinch fixe plus ou moins α et T . On a choisi :

$$T = 15 \mu\text{sec} \quad \alpha = 0,05 \quad (5)$$

ce qui donne, pour le temps de montée : $\tau = 0,75 \mu\text{sec}$. L'impédance et la tension sont encore à déterminer.

En réalité, la forme de l'impulsion ne sera pas exactement celle de la fig. 1, ceci pour deux raisons :

- a) seul un nombre fini d'éléments peut être utilisé
- b) le courant n'est pas donné par (3) si la décharge a lieu dans une impédance.

En ce qui concerne a), on a fixé le nombre d'éléments à 7.

En ce qui concerne b), la charge du dispositif, qui sera essentiel-

lement inductive, ne doit pas présenter une impédance supérieure à celle de la source :

$$\frac{\pi L_0}{2 \tau} \leq Z \quad \text{avec } L_0 = 0,26 \mu\text{H} \quad (6)$$

On a vérifié expérimentalement (A. Heym) que la forme d'impulsion reste acceptable si la condition (6) est satisfaite. Elle nous fixe les valeurs de Z admissibles. On a décidé de satisfaire (6) en réalisant le circuit en huit groupes mis en parallèle, chacun ayant une impédance $Z = 0,5 \text{ ohm}$.

On obtient ainsi les valeurs suivantes :

$L_1 = 1,88 \mu\text{H}$	$C_1 = 12,12 \mu\text{F}$	$F_1 = 33,3 \text{ KHz}$
$L_3 = 1,91 \mu\text{H}$	$C_3 = 1,326 \mu\text{F}$	$F_3 = 100 \text{ KHz}$
$L_5 = 1,97 \mu\text{H}$	$C_5 = 0,461 \mu\text{F}$	$F_5 = 167 \text{ KHz}$
$L_7 = 2,079 \mu\text{H}$	$C_7 = 0,223 \mu\text{F}$	$F_7 = 233 \text{ KHz}$
$L_9 = 2,22 \mu\text{H}$	$C_9 = 0,126 \mu\text{F}$	$F_9 = 300 \text{ KHz}$
$L_{11} = 2,42 \mu\text{H}$	$C_{11} = 0,078 \mu\text{F}$	$F_{11} = 367 \text{ KHz}$
$L_{13} = 2,71 \mu\text{H}$	$C_{13} = 0,049 \mu\text{F}$	$F_{13} = 433 \text{ KHz}$

Finalement, on doit choisir la tension de charge de sorte que l'on obtienne le courant nécessaire. Le Theta-pinch peut être produit confortablement avec une pression magnétique d'une trentaine d'atmosphères, ce qui exige un courant total de 700 KAm. On a fixé la tension à 50 KV, ce qui nous donnera 100 KAm par groupe, soit 800 KAm au total.

On doit maintenant vérifier que le temps de montée de l'impulsion reste acceptable avec les approximations faites.

On peut l'estimer de la façon suivante :

$$\tau \approx 2 I_{\text{max}} \left(\frac{dt}{dI} \right)_0$$

Puisque $\left(\frac{dI}{dt} \right)_0 = \frac{V}{L_x}$ et $L_x = L_0 + (\sum L_n^{-1})^{-1} = 0,56 \mu\text{H}$,

on obtient $\tau = 2 \frac{L_x}{Z} \approx 2 \mu\text{sec}$.

Les maxima de courant dans chaque circuit oscillant, calculés pour $V = 50 \text{ KV}$, sont

$$\begin{array}{llll} I_1 = 125 \text{ KAm} & I_3 = 41 \text{ KAm} & I_5 = 24 \text{ KAm} & I_7 = 16 \text{ KAm} \\ I_9 = 11,4 \text{ KAm} & I_{11} = 9 \text{ KAm} & I_{13} = 6,8 \text{ KAm} & \end{array}$$

Circuit pratique

Les inductances sont constituées par des câbles coaxiaux. L'avantage tiré de l'utilisation de tels câbles est que ceux-ci sont capables de résister à des contraintes électromagnétiques intenses tout en assurant le transport de l'énergie à une certaine distance du banc de condensateurs. Les arrivées des câbles sont branchées en parallèle sur la bobine dans laquelle on produit le champ de confinement.

Il est nécessaire d'ajuster la fréquence de résonance de chaque circuit oscillant. Pour faciliter cette opération, il a été jugé utile d'adjoindre à la sortie de chaque condensateur une petite self de 3 spires pouvant être réglée de l'extérieur. On peut faire varier la fréquence de 4 %. On a cependant renoncé à utiliser cette self de correction sur le circuit $L_1 C_1$ en raison des difficultés provoquées par les forces d'origine magnétiques développées par le passage d'un courant de 125 KAm.

Le dispositif de commutation de la décharge est constitué, suivant la tension appliquée, par un ignitron ou un éclateur inséré dans le retour des câbles coaxiaux.

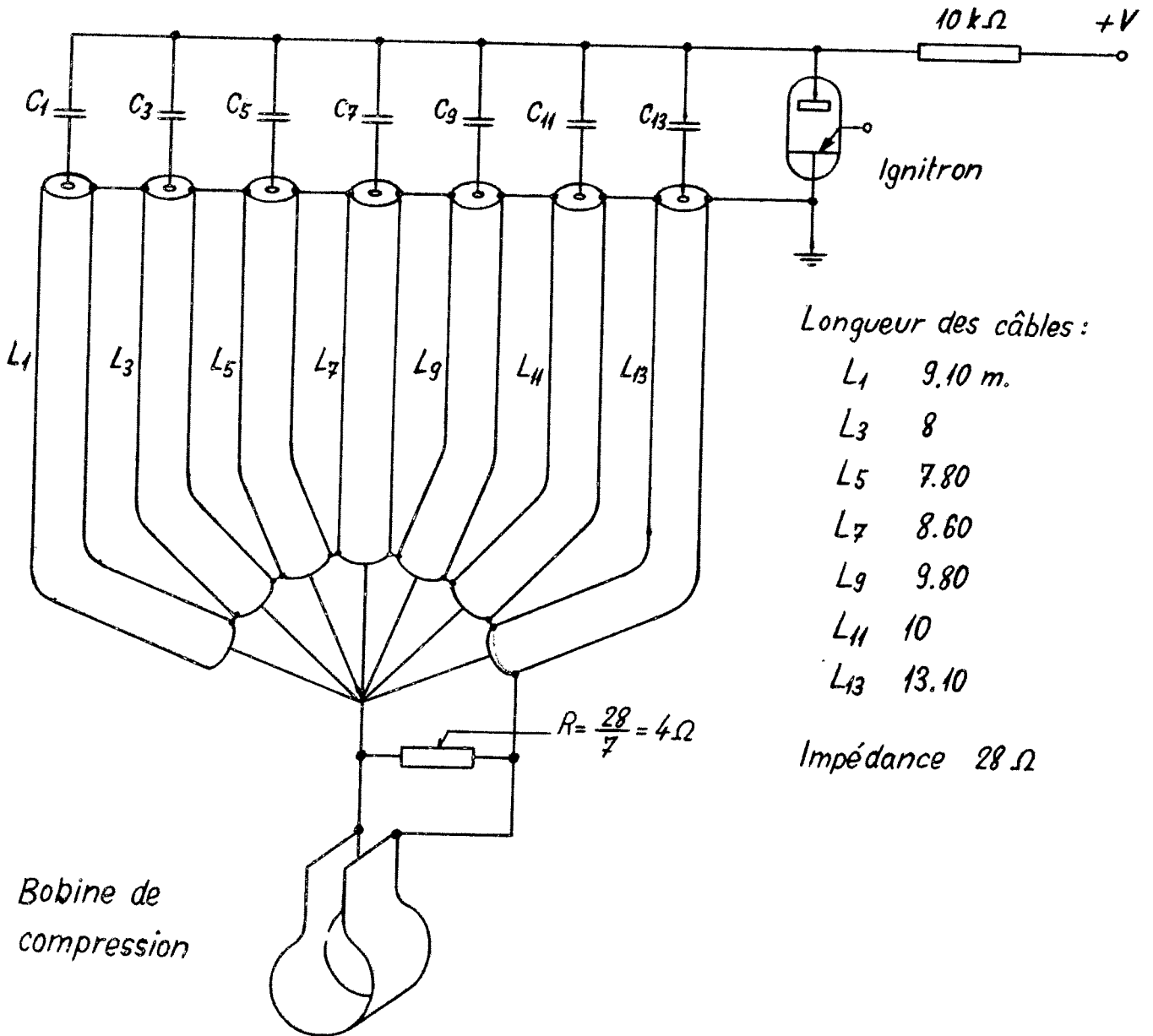
La résistance d'isolation de la source haute tension est de 10 K Ω .

Le circuit de charge des condensateurs est le suivant : alimentation + V, résistance 10 K Ω , condensateurs C_1 à C_{13} , conducteur central des câbles coaxiaux, bobine de compression, gaine des câbles, terre.

Lors de la décharge, chaque circuit oscillant se referme à travers la bobine de compression.

Lorsque le dispositif de commutation s'amorce, une impulsion de tension à front raide est appliquée à l'entrée des câbles et se propage dans ceux-ci. Afin d'éviter de multiples réflexions qui fatigueraient le diélectrique, il a été trouvé utile de fermer l'ensemble des câbles sur la résistance caractéristique, une valeur de 4 Ω dans le cas particulier. Remarquons que la valeur de cette résistance est beaucoup plus grande

que l'impédance de la bobine de compression.



Réalisation

Banc de condensateurs. Les condensateurs sont assemblés sur une grande tôle d'anticorodal formant l'électrode + haute tension. Les gaines des câbles coaxiaux, formant le circuit de retour, sont assemblées sur une deuxième tôle tenant lieu d'électrode de terre. Ces deux électrodes, de grande surface, sont séparées par plusieurs couches de polyéthylène. Cette disposition assure au système une self-induction parasite minime. Le dispositif de commutation de la décharge, ignitron ou éclateur, est monté au centre de ces plaques, la cathode reliée à la plaque inférieure, l'anode à la plaque supé-

rieure.

La plaque inférieure, électrode de terre, repose sur un bâti métallique posé sur le sol. Les condensateurs, montés sur la plaque supérieure, forment une superstructure qui, par son propre poids, assure le serrage des feuilles de polyéthylène prises entre les deux électrodes.

Le pôle des condensateurs qui est connecté au câble coaxial doit traverser l'ensemble des deux plaques. Les problèmes d'isolation posés par ces traversées ont été résolus de la façon suivante (voir coupe dans l'axe du condensateur C_3) : le perçage de la plaque à traverser est porté à 200 mm de diamètre. Par dessus cette découpe, on a riveté une collerette prolongée par un tube. Le dégagement ainsi obtenu est comblé par une coulée de résine Araldite qui se prolonge dans le tube soudé sur la collerette. Sur la tôle inférieure, l'exécution des raccordements de câble est légèrement différente : le tube métallique n'est pas soudé sur la collerette, mais boulonné; le moulage tubulaire d'Araldite est d'un diamètre inférieur et permet l'insertion d'un tube amovible qui isole la paroi de la sortie de câble. Cette disposition autorise le démontage de toutes les parties composantes et assure un chemin de claquage d'au moins 100 mm le long des isolants.

Chaque condensateur, à l'exception de C_1 , est relié à son câble coaxial par une self ajustable de 3 spires. Cette self est moulée, jusqu'à la naissance des sorties axiales, dans une masse de Makrolon. Ce moulage assure la stabilité mécanique de la bobine et lui permet de résister aux chocs dus à la décharge du condensateur. Le diamètre extérieur du moulage est soigneusement calibré et sert de guide à un manchon de cuivre coulissant; c'est ce manchon qui permet de régler la valeur de la self-induction. Il est forcé sur une lunette isolante qui est déplacée, de l'extérieur de la boîte, en vissant ou en dévissant simultanément deux tiges de nylon partiellement filetées.

Entre ces deux tiges se trouvent 4 colonnes isolantes qui emprisonnent le départ du conducteur central du câble. La gaine du coaxial est serrée par une bride sur un petit tube soudé sur le fond de la boîte.

Les 7 câbles coaxiaux d'un banc de condensateurs se rejoignent dans une boîte de jonction construite en forme de secteur de circonférence.

Les deux côtés en tôle de 3 mm de la boîte sont vissés, suivant un rayon, sur un profil U qui forme l'une des amenées de courant à la bobine de compression. La boîte est fermée, le long de l'arc de cercle de 90°, par un méplat portant des douilles régulièrement espacées. Les gaines des câbles sont serrées par des brides sur ces douilles. Seul le conducteur central, entouré de son isolation au polyéthylène, traverse l'arc et se prolonge radialement vers une capsule sur laquelle il vient se souder. La capsule, entourée de feuilles de polyéthylène, est prolongée par un profil U qui forme l'autre amenée de courant à la bobine de compression. Elle est enfermée dans la boîte réunissant les gaines des câbles et pressée contre le profil U de la boîte par une colonne isolante. L'ensemble n'a qu'une faible épaisseur, ce qui permet de monter plusieurs de ces boîtes, côte à côte, le long de la bobine de compression.

La bobine de compression, réalisée en deux coquilles d'anticorodal assemblées par boulonnage, épouse étroitement la forme du tube de verre dans lequel est confiné le plasma.

Les deux extrémités, de part et d'autre de la partie centrale cylindrique, sont taillées en cône. On obtient ainsi un effet miroir aux extrémités de la zone de confinement. Les deux lèvres de la bobine, du côté opposé au boulonnage, reçoivent deux plaques conductrices minces séparées par une couche isolante. Les boîtes de jonction des câbles viennent se greffer sur ces plaques. Cette disposition permet une meilleure répartition du courant.

Résultats

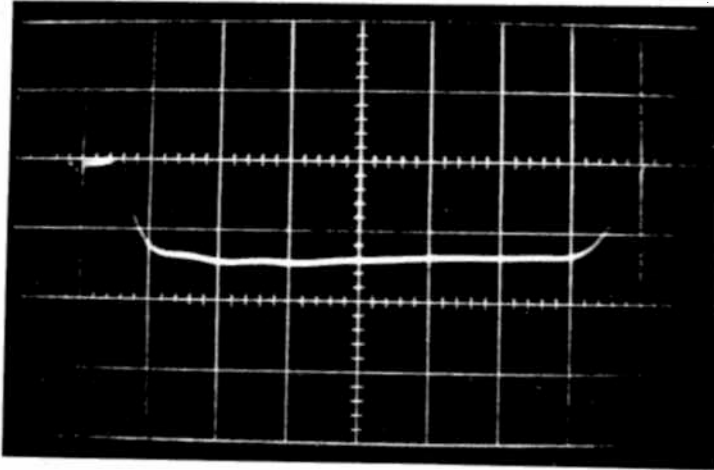
Les oscillogrammes ci-après sont obtenus en glissant une sonde magnétique au centre d'une bobine branchée sur la boîte de jonction des câbles d'un banc de condensateurs. La tension de la sonde est intégrée avant d'être appliquée à l'oscilloscope.

Dans les deux cas, le dispositif de commutation de la décharge est un ignitron.

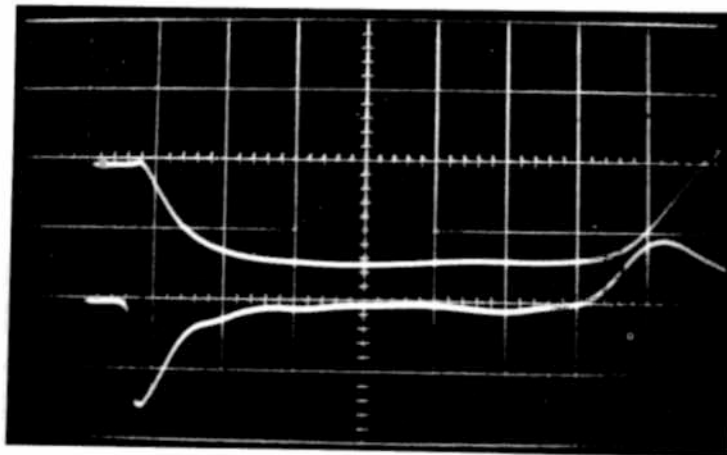
Dans le premier cas, la bobine présente un faible coefficient de

self induction et l'on obtient un temps de montée très voisin du temps théorique entrant dans les formules ($0,75 \mu\text{sec.}$).

Dans le deuxième cas, plus proche des conditions de travail réelles du banc, le temps de montée est altéré par la charge inductive non négligeable.



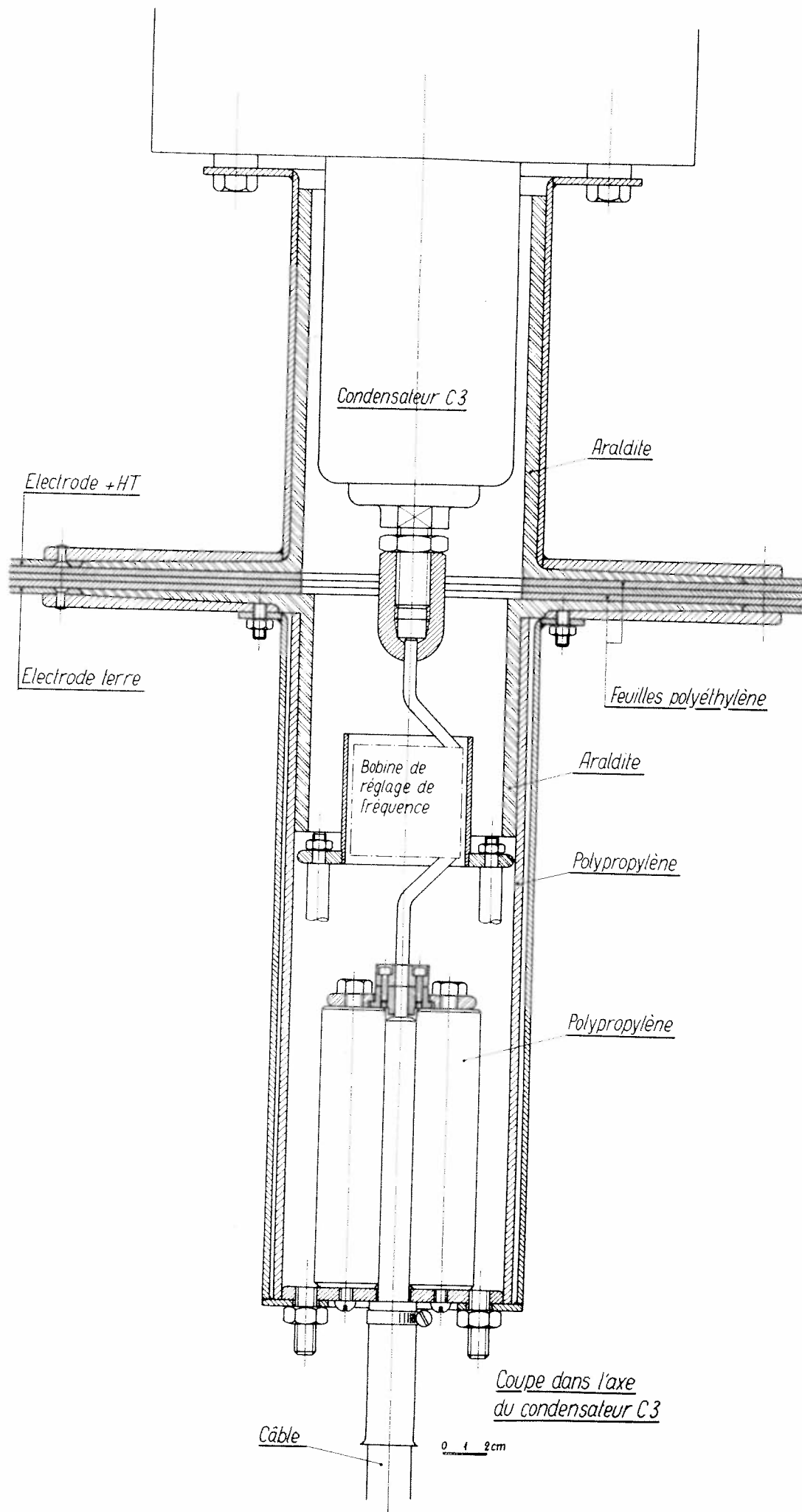
1) Bobine $0,04 \mu\text{H}$ $V = 10 \text{KV}$ $I = 20 \text{KAmp}$ $2 \mu\text{sec/div.}$

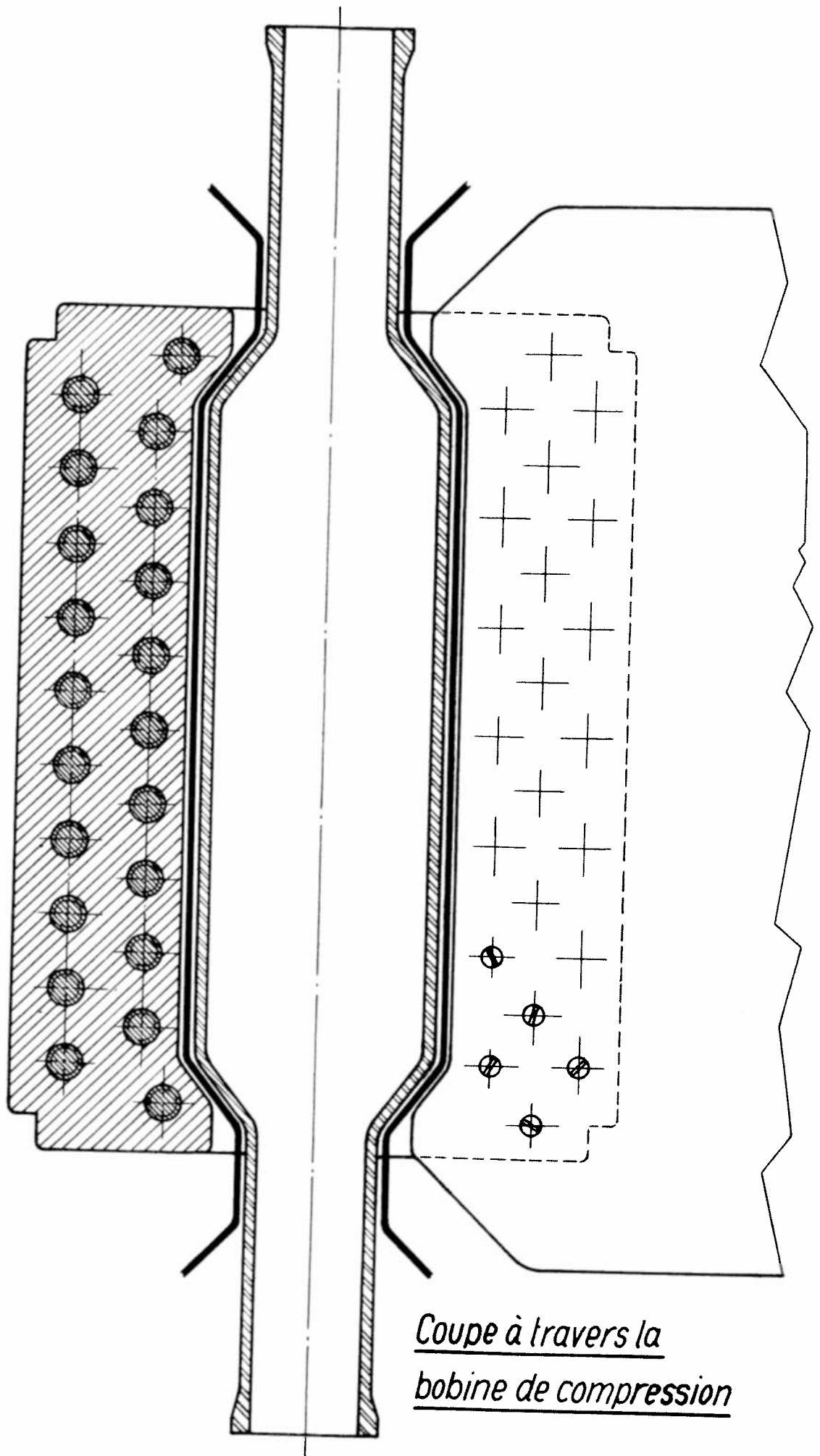


2) Bobine $0,3 \mu\text{H}$ $V = 10 \text{KV}$ Trace sup. : courant $I = 20 \text{KAmp}$
Trace inf. : tension aux bornes de la bobine. $2 \mu \text{sec/div.}$

Référence

(1) : Pulse Generators; MIT, vol. 5





Coupe à travers la
bobine de compression

Boîte de jonction des câbles

