

Avril 1963

LRP 6-63

PRINCIPE D'UN GENERATEUR HF A LIGNE

et

ETUDE D'UN ECLATEUR DECLENCHE PAR DEFORMATION DU CHAMP

A. Heym

Résumé

Le rapport décrit le principe d'un générateur haute fréquence basé sur la décharge cyclique de lignes à travers des éclateurs déclenchés. Il est rendu compte des premiers essais de mise en forme d'impulsions carrées à l'aide d'éclateurs et l'on présente l'étude d'un éclateur dont l'électrode de déclenchement est entièrement isolée par du verre et agissant par déformation du champ dans l'intervalle interélectrodes.

Principe d'un générateur HF à ligne

et

Etude d'un éclateur déclenché par déformation du champ

A. HEYM

Introduction

L'un des projets de notre laboratoire est l'étude de la stabilisation d'un théta pinch par l'application d'un champ magnétique axial à haute fréquence. L'appareillage comprend un tube de pyrex, contenant de l'hydrogène à faible pression, entouré d'une spire unique qui est alimentée par 8 bancs de condensateurs branchés en parallèle. Ces bancs délivrent une impulsion de courant carrée de ~ 1 μ sec de temps de montée et de 15 μ sec de durée, sous une impédance interne individuelle de 0,5 Ω . Lors de la décharge simultanée des 8 bancs de condensateurs chargés à 50 kV, un courant de 800 kA parcourt la bobine de compression, produisant un champ magnétique axial de 30 kGauss.

Deux électrodes d'acier inoxydable, insérées aux extrémités du tube de pyrex, permettent d'appliquer sur le plasma un courant alternatif à haute fréquence, fourni par un générateur de grande puissance. Ce courant engendre le champ magnétique destiné à la stabilisation du pinch. Une estimation théorique de la puissance haute fréquence nécessaire à la production de ce champ axial montre que 1 Mw installé fournit environ 100 Gauss dans nos conditions expérimentales. Un générateur de 300 Mw serait donc nécessaire pour obtenir un champ axial du même ordre de grandeur que le champ axial. On escompte cependant obtenir un effet de stabilisation avec un champ beaucoup plus faible et dans l'état actuel du projet, on construit un oscillateur à tubes électroniques d'une puissance de 10 Mw (MM. Geiger et Lietti, Rapport LRP 4-63). D'autres dispositifs, faisant appel à la décharge de lignes sont à l'étude. Ce travail enfin décrit les premiers essais effectués en vue de la réalisation d'un troisième dispositif à lignes.

Principe de base

Considérons (fig. 1) deux lignes d'impédance caractéristiques Z_0 reliées entre elles par un interrupteur S. L'extrémité libre de la ligne I est ouverte alors que celle de II est fermée sur son impédance caractéristique. Si l'on charge la ligne I à la tension $+V_0$ et que l'on ferme l'interrupteur S, des fronts d'onde d'amplitude $\frac{V_0}{2}$ et de signes opposés se propagent dans les deux lignes. Le front positif, qui se déplace dans la ligne II, s'absorbe sans réflexion dans la résistance $R = Z_0$ alors que le front négatif se réfléchit sans changement de signe à l'extrémité ouverte de la ligne I. Ce front réfléchi se propage jusqu'à la résistance R, où il s'absorbe. On produit ainsi aux bornes de la résistance R une impulsion de tension d'amplitude $\frac{V_0}{2}$ et d'une durée égale à 2 fois le temps de transit τ du front d'onde dans la ligne I. Dès que cette impulsion est absorbée sur la résistance R, le système est entièrement déchargé et aucun courant ne parcourt plus les lignes. L'interrupteur S, constitué par un éclateur, se trouve alors à tension et à courant nuls, soit dans les conditions de déionisation. Lorsque celle-ci est achevée, l'éclateur est capable de supporter à nouveau la tension V_0 sans claquer, on peut recharger la ligne I et recommencer le cycle.

La figure 2 montre le schéma d'un générateur fonctionnant selon le principe exposé. Plusieurs lignes d'impédance Z_0 (L_1, L_2, \dots, L_n) sont terminées à leurs extrémités par des éclateurs $S_1 \dots S_n$ et $T_1 \dots T_n$. Tous les éclateurs S_i ont une électrode commune reliée au conducteur central de la ligne L_0 qui est terminée par une résistance R_0 égale à son impédance caractéristique. L'une des électrodes de chacun des éclateurs T_i est reliée à un condensateur de grande capacité C par l'intermédiaire d'une résistance de charge R. Les éclateurs S_i et T_i sont du type déclenchés. Ils possèdent une électrode principale lorsqu'elle reçoit une impulsion convenable. Dans notre montage, les impulsions de déclenchement sont prélevées directement sur les lignes L_i à l'aide de lignes U_i et V_i d'impédance $Z \gg Z_0$. Ces dernières sont adaptées à leur extrémité et attaquent les électrodes de déclenchement des éclateurs S_i et T_i par l'intermédiaire de transformateurs. Le temps de transit d'une impulsion dans les lignes U_i est égal à deux fois celui des lignes L_i , alors que celui des lignes V_i n'est pas critique.

Pour décrire le cycle de fonctionnement de l'appareil, prenons les conditions initiales suivantes : le condensateur C est chargé à la tension $+V_0$, ainsi que les lignes L_1 à L_j ; les autres lignes L_{j+1} à L_n sont déchargées; la ligne L_0 n'est parcourue par aucun courant. Au temps zéro l'éclateur S_1 se déclenche. La ligne L_1 se décharge et une impulsion carrée positive d'amplitude $\frac{V_0}{2}$ apparaît sur le câble L_0 ainsi que sur les électrodes communes des éclateurs S_1 . Cette impulsion n'a aucun effet sur les éclateurs correspondants aux lignes chargées (L_2 à L_j), car elle provoque une diminution de la tension appliquée sur eux.

Les éclateurs S_{j+1} à S_{n-1} sont entièrement déionisés et supportent cette impulsion dont l'amplitude n'est égale qu'à la moitié de la tension normalement appliquée. Le comportement de l'éclateur S_n , dont le fonctionnement précède celui de S_1 est seul critique. Il faut en effet que sa déionisation soit suffisamment avancée pour qu'une impulsion d'amplitude $\frac{V_0}{2}$ ne le déclenche pas à nouveau. Ce temps de déionisation fixe la fréquence maximum que peut atteindre le générateur. Nous avons mesuré un temps de déionisation de l'ordre de $1,5 \mu\text{sec}$ pour un éclateur rempli d'hydrogène et ne comportant aucun dispositif accélérant la déionisation.

Les fronts négatifs apparaissant sur la ligne L_1 se propagent également sur les lignes à haute impédance U_1 et V_1 et déclenchent les éclateurs S_2 et T_{j+1} au bout d'un temps égal au temps de transit de ces lignes. La ligne L_2 se décharge tandis que L_{j+1} se charge à la tension du condensateur C. Le cycle se poursuit ainsi jusqu'à ce que le condensateur C soit déchargé à une tension telle que le déclenchement des éclateurs ne soit plus possible.

Le nombre des lignes du dispositif doit être déterminé par la durée du train d'impulsion requis. En effet, un fonctionnement fréquent des éclateurs mène à leur échauffement et à une diminution de leur tension de claquage.

Etude d'un éclateur

Les premiers essais, relatifs au générateur décrit ci-dessus, ont portés sur la production d'impulsions carrées, mises en forme à

l'aide de lignes de 50 Ω chargées à la tension de 15 kV et déchargées à travers un éclateur à 3 électrodes de conception classique. La figure 3a montre le schéma du circuit utilisé et 3b un croquis de l'éclateur.

Ces expériences ont montré que la production d'impulsions à front raide par ce moyen était aisée, mais qu'un découplage entre l'électrode de déclenchement et les électrodes principales était souhaitable pour éviter des oscillations parasites du système après la formation de l'impulsion. En effet, lors du déclenchement de l'éclateur, on excite également un circuit oscillant comprenant la self de fuite du transformateur d'attaque. Un courant oscillant amorti circule entre les électrodes après la formation de l'impulsion et retarde la déionisation qui ne peut avoir lieu qu'à courant nul.

Pour pallier cet effet, on a construit un éclateur dont l'électrode de déclenchement est entièrement isolée par rapport aux autres électrodes (fig. 4). Son enveloppe de verre résiste à des pressions de 8 atmosphères et supporte les 3 électrodes, insérées par des soudures verre-métal. Les électrodes principales, d'un diamètre de 8 mm sont distantes de 2,5 mm. Celle de haute tension ne possède qu'une légère courbure, alors que celle de masse se présente sous la forme d'une pointe taillée à 60°, dont l'extrémité est arrondie. L'électrode de déclenchement est annulaire, elle est faite à l'aide d'un fil de 1 mm de diamètre; son diamètre intérieur est de 4 mm. Elle est entièrement recouverte d'une couche de 1 mm de verre. Les électrodes sont faites d'un alliage ferreux de même coefficient de dilatation que le verre appelé Vacen.

Le fonctionnement d'un tel éclateur est différent de celui d'un éclateur ordinaire. Lorsque l'électrode supérieure est à un potentiel positif alors que les électrodes de masse et de déclenchement sont simultanément à tension nulle, un champ que l'on peut qualifier approximativement de constant s'établit dans l'éclateur. Une impulsion négative appliquée à l'électrode de déclenchement isolée provoque une déformation du champ dans l'intervalle compris entre les électrodes principales. Ce champ peut devenir assez intense au voisinage de l'anode pour que des avalanches électroniques prennent naissance et déterminent l'amorçage de l'étincelle.

La figure 5 montre la répartition du potentiel le long de l'axe de l'éclateur, relevée à l'aide d'une cuve électrolytique; l'abscisse $x = 0$ représente la cathode et $x = 2,5$ mm l'anode. On a reporté en paramètre le rapport de la tension appliquée entre les électrodes principales et la tension de l'électrode de déclenchement.

Ce relevé montre que pour une tension nulle, le champ est presque constant le long de l'axe de l'éclateur. Des tensions d'impulsions croissantes renforcent de plus en plus le champ au voisinage de l'anode, alors qu'elles l'affaiblissent, puis l'inversent même à la cathode. Une zone à champ faible, d'une extension croissante, s'installe sitôt après une chute cathodique pour des tensions d'impulsion élevées.

Mesures

Des essais préliminaires ayant montré que la déionisation est plus rapide dans l'hydrogène que dans l'air, c'est avec ce gaz que nous avons testé le fonctionnement de l'éclateur. L'appareillage utilisé est celui de la figure 3a.

a) La courbe de la figure 6 montre l'évolution de la tension de claquage spontanée, c'est-à-dire en l'absence d'impulsion de déclenchement, en fonction de la pression d'hydrogène. Cette courbe est linéaire dans les marges d'erreur expérimentales dues à la faible reproductibilité du phénomène qui dépend fortement de l'état de surface des électrodes.

b) La deuxième série de mesures a porté sur l'amplitude des impulsions nécessaires au déclenchement de l'éclateur en fonction de la pression et de la tension appliquée entre les électrodes principales. On mesure l'amplitude minimum d'impulsion nécessaire au déclenchement certain de l'éclateur à une pression et à une tension données. Le déclenchement est déclaré certain si 30 impulsions successives déclenchent l'éclateur.

La courbe de la figure 7 montre que le déclenchement d'un éclateur du type étudié est indépendant de la pression si l'on rapporte les différentes tensions à celle de claquage spontané.

c) On a mesuré le délai de déclenchement et la dispersion de ce temps (jitter) pour 2 pressions et différentes tensions. On superpose sur la même photographie les traces oscillographiques de 50 impulsions mises en forme par l'appareillage de la figure 3a et prélevées sur l'électrode de masse de l'éclateur à l'aide d'une sonde haute tension (R. Keller : Rapport LRP 1-63 et LRP 2-63). Le balayage de l'oscilloscope (Tektronix 585) est déclenché par la même impulsion que l'éclateur, de telle sorte que la photo permet de déterminer directement le jitter et le délai, si l'on tient compte d'un retard supplémentaire de 60 nsec dû à la différence de temps de transit dans les câbles de mesure et de déclenchement.

La figure 8 montre une de ces photos, alors que les courbes des figures 9 à 12 résument l'ensemble des mesures. La largeur d'un paquet de 50 traces est défini comme étant le jitter alors que le délai indiqué est le retard moyen de déclenchement de l'éclateur.

Ces courbes montrent que la caractéristique de l'éclateur peut se diviser en 3 domaines, dont l'existence peut se justifier par les considérations suivantes :

- 1) Pour de petites impulsions de déclenchement, le délai et le jitter sont de l'ordre de quelques microsecondes. Dans ce domaine de fonctionnement, le champ n'atteint nulle part la valeur de rupture dans l'intervalle situé entre les électrodes principales. Le déclenchement de l'éclateur a lieu à partir des avalanches électroniques formées dans le champ intense qui apparaît lors de chaque impulsion, entre le cône de l'électrode de masse et le verre isolant l'électrode de déclenchement, ceci à cause de la grande constante diélectrique du verre.
- 2) Dans la zone de fonctionnement intermédiaire, délai et jitter atteignent un minimum. Le déclenchement a lieu par déformation du champ dans l'espace compris entre les électrodes principales.
- 3) La partie remontante des courbes est explicable en se référant à la figure 5. La zone à potentiel presque constant qui apparaît aux grandes tensions d'impulsions est peu favorable à la propagation de l'étincelle, d'où augmentation du délai et du jitter.

Conclusions

Les essais menés jusqu'à ce jour ont montré la possibilité de construire un éclateur muni d'une électrode de déclenchement à haute impédance agissant par déformation du champ électrique de l'espace compris entre les électrodes principales. Un tel éclateur possède des caractéristiques satisfaisantes tant au point de vue du délai de déclenchement que du jitter, s'il est utilisé dans des conditions de tension et de pression favorables.

L'utilisation de cet éclateur dans le montage du générateur haute fréquence projeté dépend de la mesure de son temps de déionisation en fonction de la nature du gaz de remplissage, étude qui n'a pas encore été entreprise systématiquement.

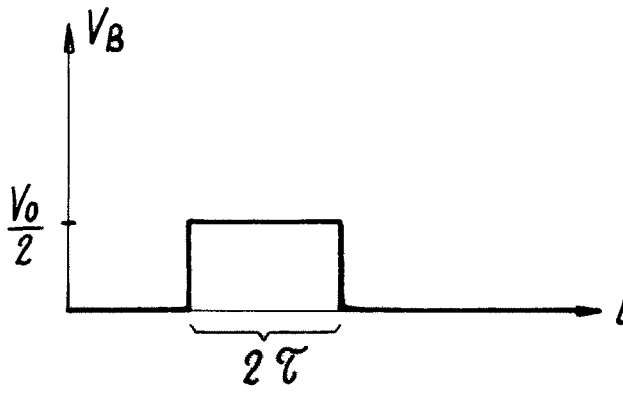
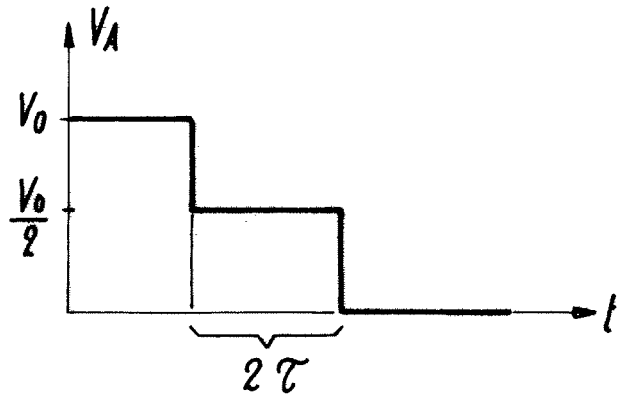
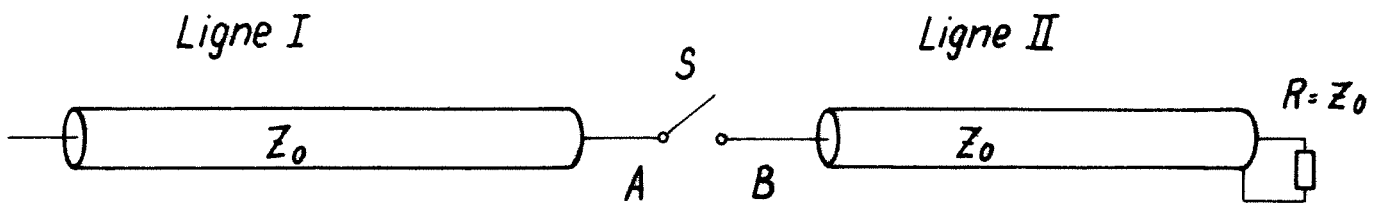


Fig. 1

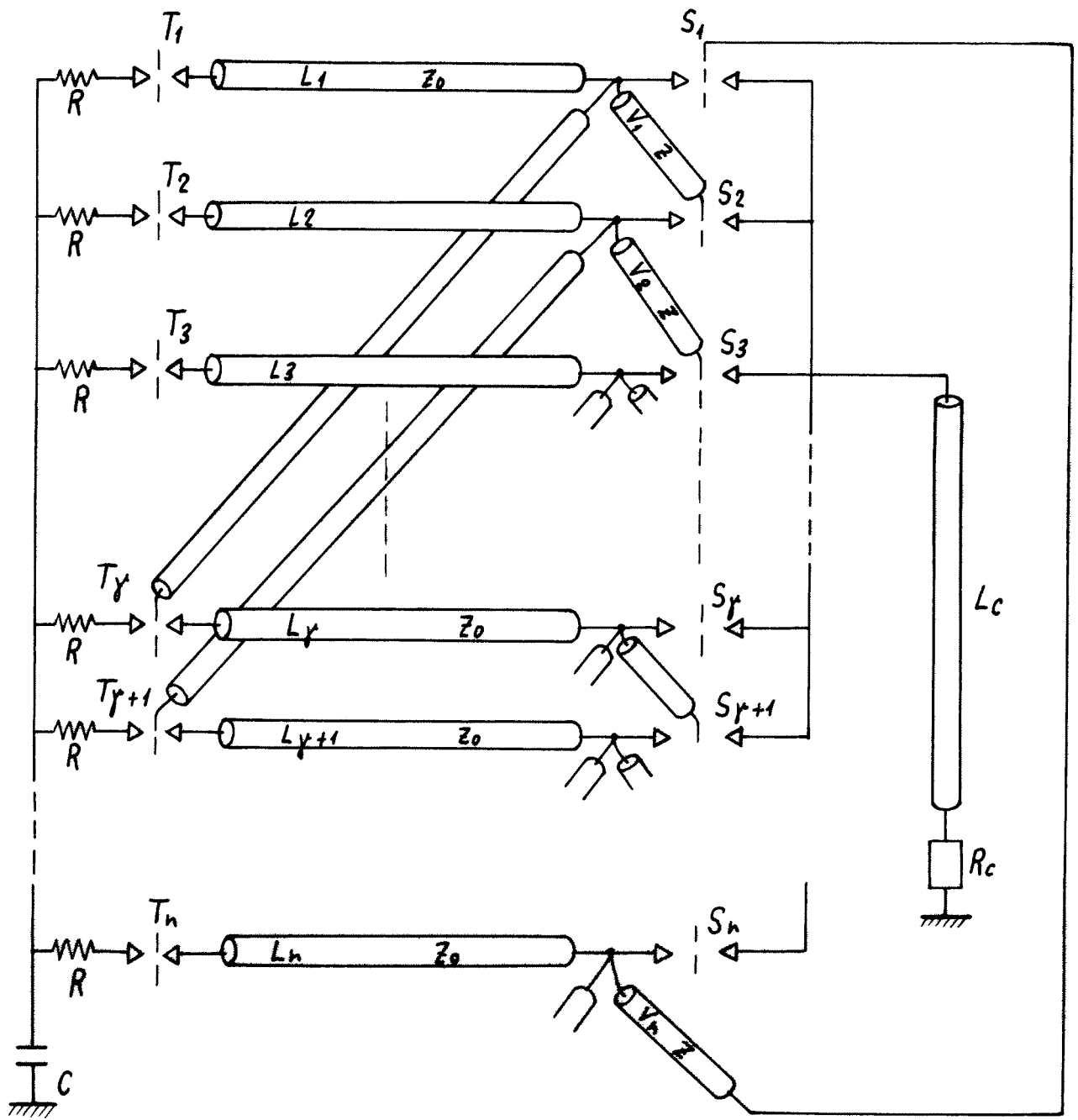


Fig. 2

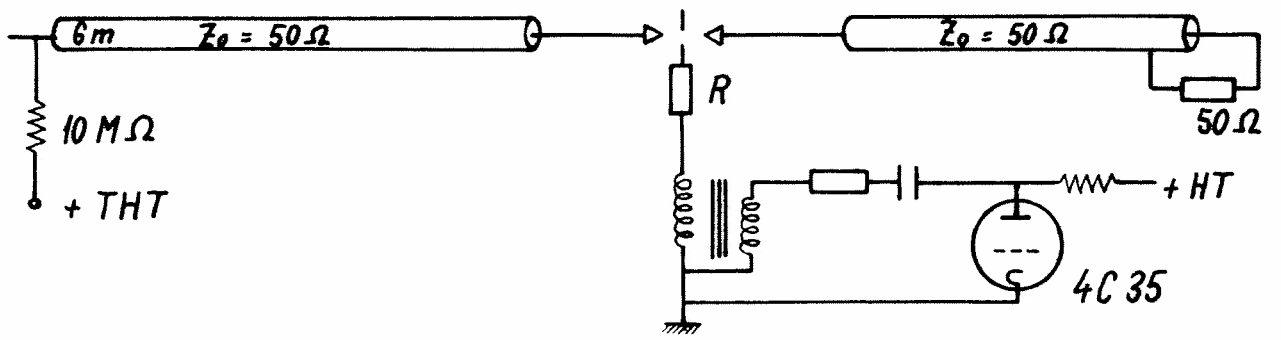
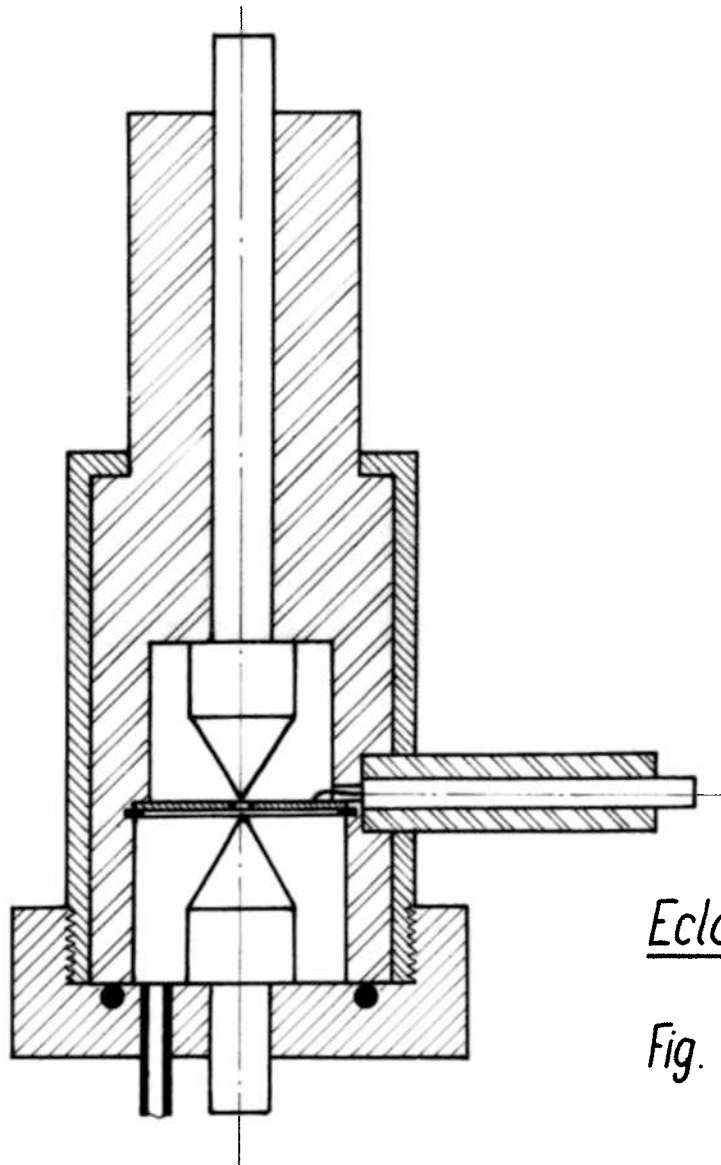
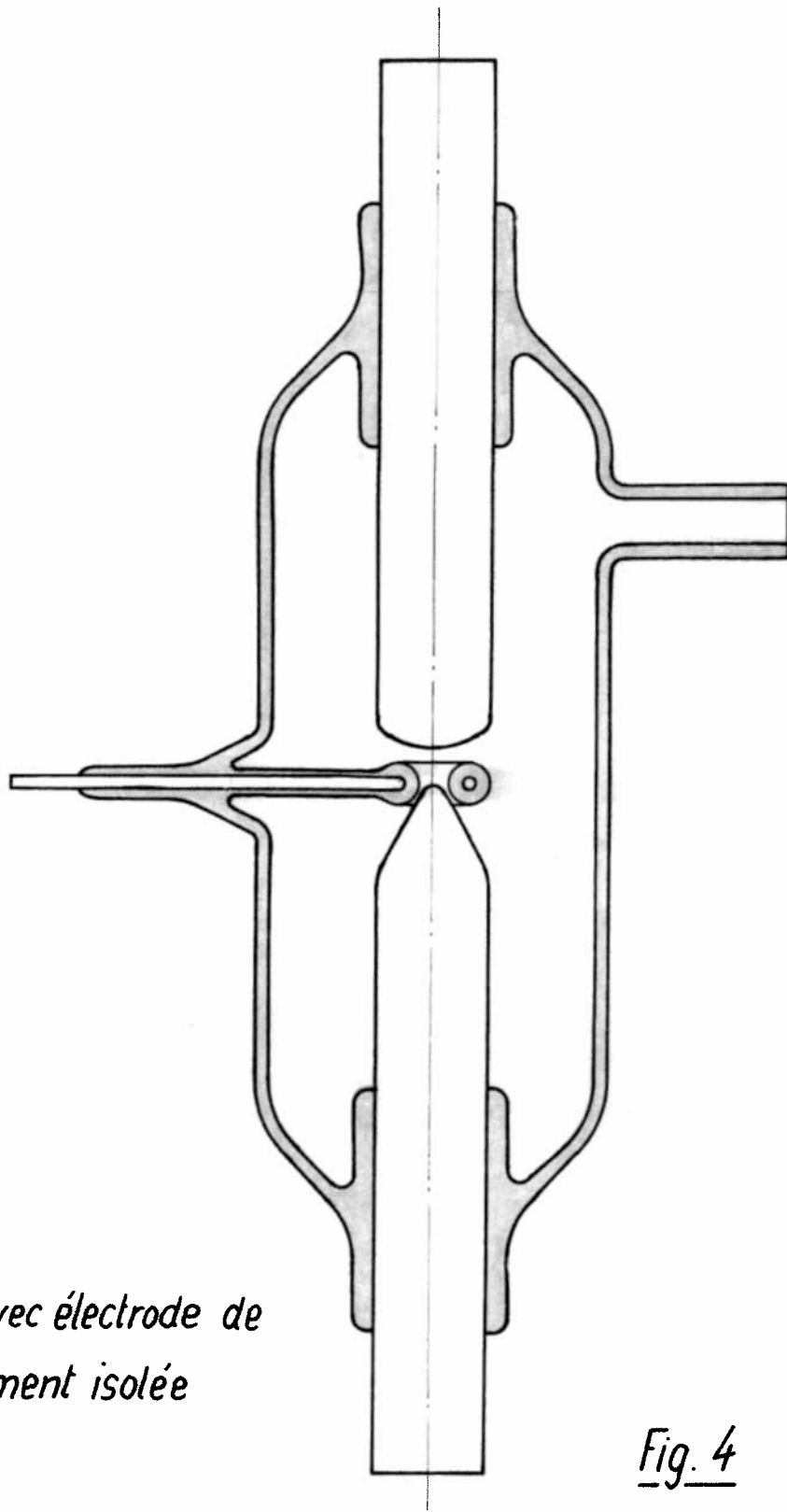


Fig. 3a



Eclateur

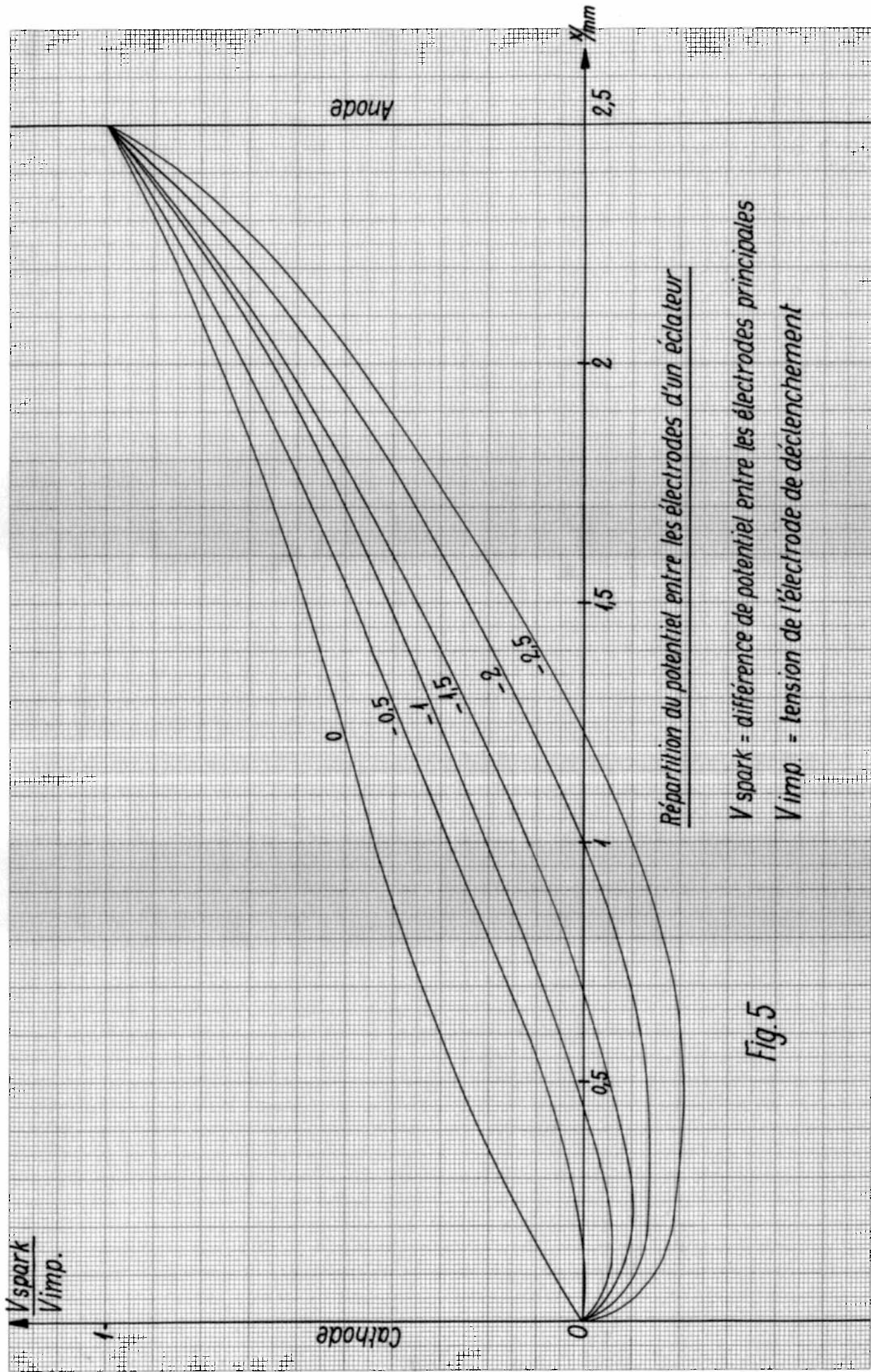
Fig. 3b



Eclateur avec électrode de déclenchement isolée

éch. 2:1

Fig. 4

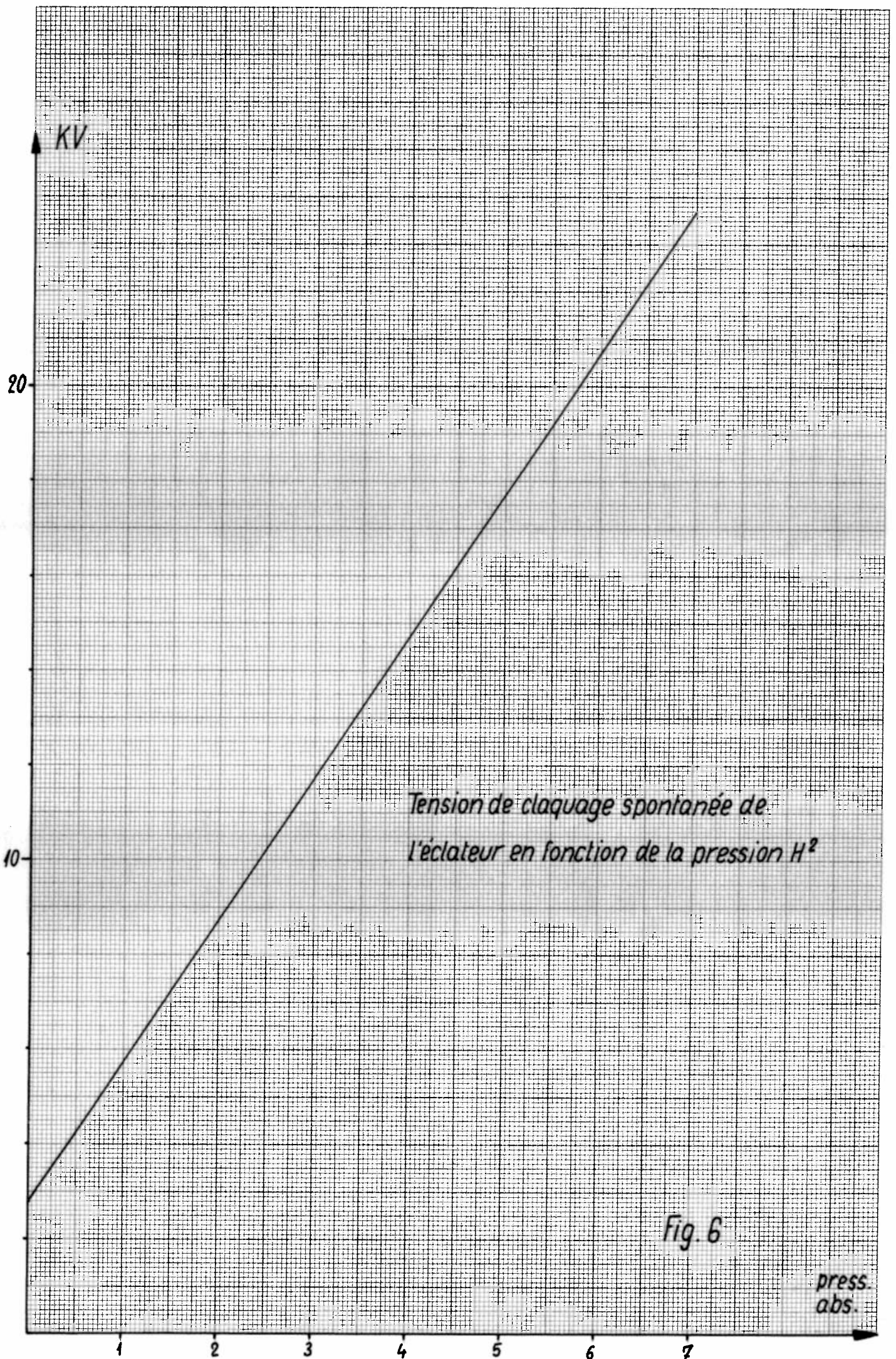


Répartition du potentiel entre les électrodes d'un éclateur

V_{spark} = différence de potentiel entre les électrodes principales

$V_{imp.}$ = tension de l'électrode de déclenchement

Fig.5



*Tension de claquage spontanée de
l'éclateur en fonction de la pression H^2*

Fig. 6

*press.
abs.*

Fig. 7 Caractéristique de déclenchement d'un éclateur avec une électrode de déclenchement isolée

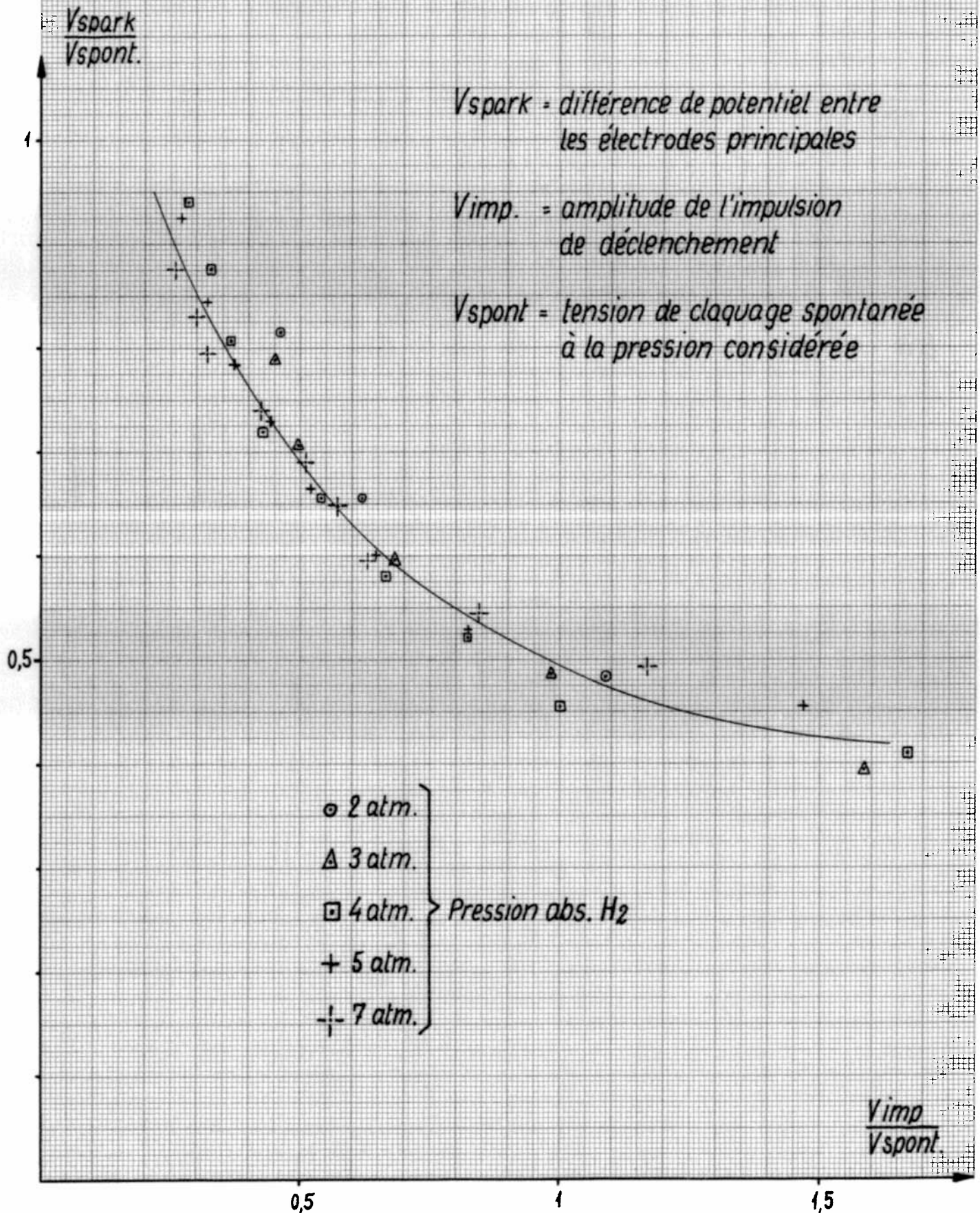


Fig. 9

Décalage de déclenchement en fonction de l'amplitude de l'impulsion de déclenchement

Pression 3 atm. abs. H₂

Paramètre $\frac{V_{spark}}{V_{spont.}}$

○ $\frac{V_{spark}}{V_{spont.}} = 0,59$

□ " = 0,67

+ " = 0,72

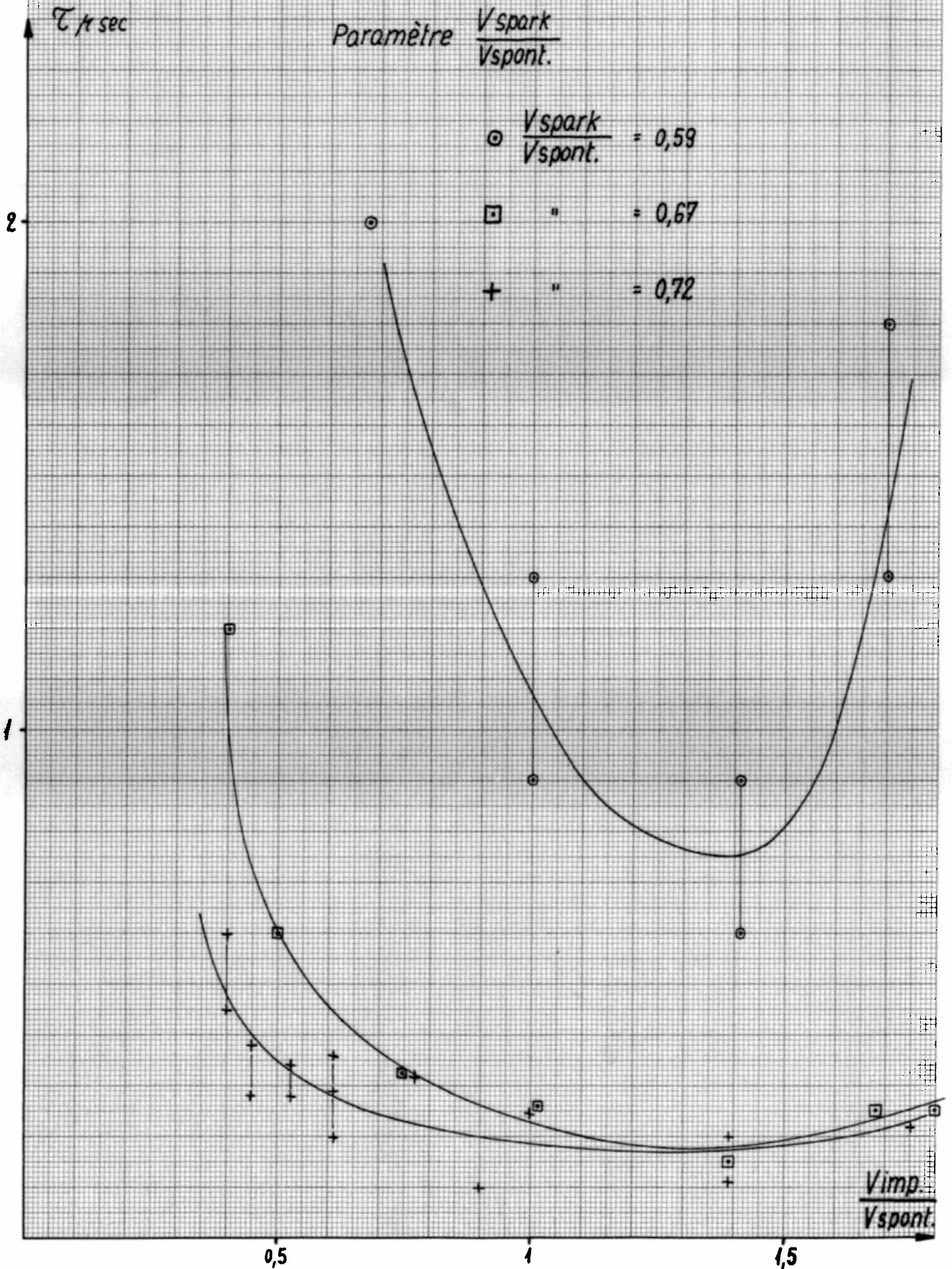


Fig. 10 Décalage de déclenchement en fonction de l'amplitude de l'impulsion de déclenchement

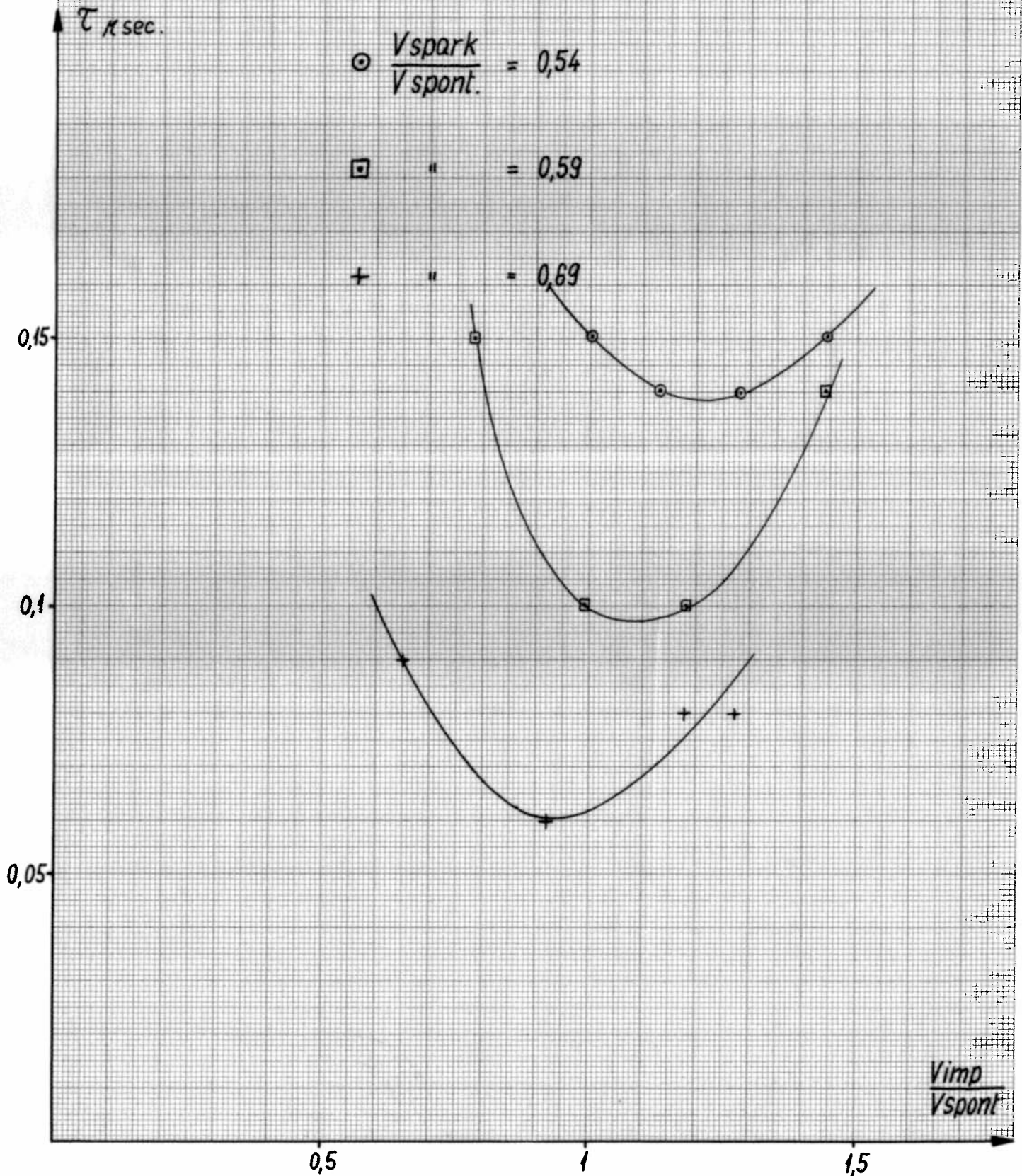
pression 5 atm. abs. H₂

paramètre $\frac{V_{spark}}{V_{spont.}}$

○ $\frac{V_{spark}}{V_{spont.}} = 0,54$

□ " = 0,59

+ " = 0,69



$\frac{V_{imp}}{V_{spont}}$

$\delta\tau / \mu\text{sec.}$

Fig. 11 Dispersion du délai de déclenchement en fonction de l'amplitude de l'impulsion de déclenchement

pression 3 atm. abs. H₂
paramètre $\frac{V_{\text{spark}}}{V_{\text{spont.}}}$

- $\frac{V_{\text{spark}}}{V_{\text{spont.}}} = 0,59$
- " = 0,67
- + " = 0,72

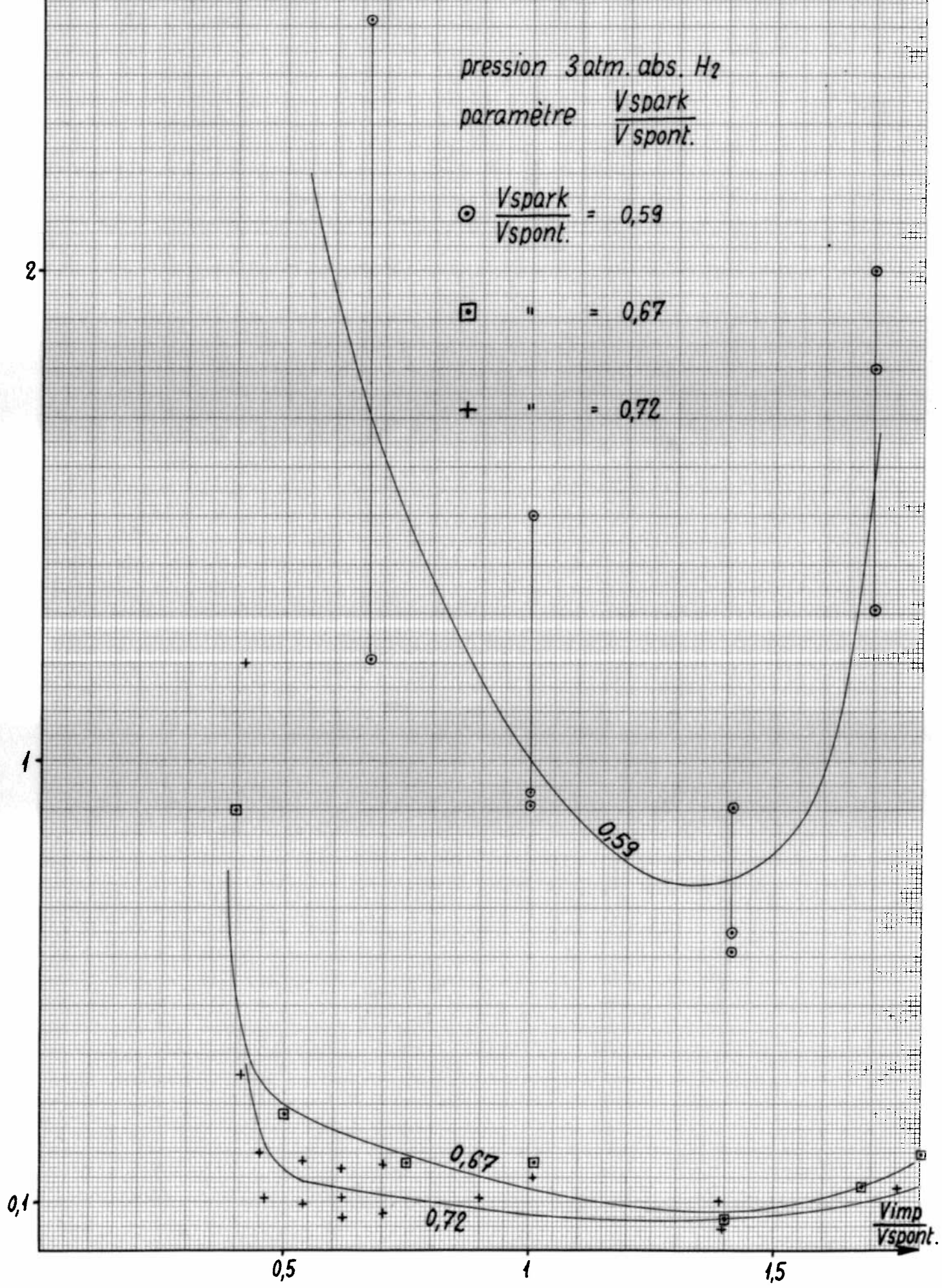


Fig. 12 Dispersion du délai de déclenchement en fonction de l'amplitude de l'impulsion de déclenchement

pression 5 atm. abs. H₂

paramètre $\frac{V_{spark}}{V_{spont.}}$

○ $\frac{V_{spark}}{V_{spont.}} = 0,54$

□ " = 0,59

+ " = 0,69

