

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CENTRE D'ETUDES DE LIMEIL

B.P. N° 27

94190 - VILLENEUVE SAINT-GEORGES

N° 463/80

FR8002554

NOTE C.E.A. N° 2151

ETUDE D'UN BANC DE CONDENSATEURS
DE 380 kJ à 80 kV POUR L'EXPERIENCE FOCUS

J.P. LE BRETON

Limeil le : 25 JUIN 1981

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CENTRE D'ETUDES DE LIMEIL

B.P. N° 27

94190 - VILLENEUVE SAINT-GEORGES

N° 463/80

NOTE C.E.A. N° 2151

ETUDE D'UN BANC DE CONDENSATEURS
DE 380 kJ à 80 kV POUR L'EXPERIENCE FOCUS

J.P. LE BRETON

Limeil le : 25 JAN 1981

RESUME

Nous décrivons le principe de fonctionnement et la mise au point d'un banc de condensateurs destiné à alimenter en énergie une expérience Focus.

Le banc est composé de 64 condensateurs dont la décharge est commandée par 64 éclateurs, eux-mêmes déclenchés par 8 sous-maîtres éclateurs et un maître éclateur. Les éclateurs comportent trois électrodes et fonctionnent sous pression d'air.

Les caractéristiques principales du banc sont sa faible inductance (12,5 nH) et la bonne synchronisation du fonctionnement des éclateurs (jitter d'environ 10 ns).

Différentes solutions technologiques ont été éprouvées et nous ont permis de parvenir à un ensemble fiable.

- PLAN -

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE

- I L'expérience Focus
 - 1. Description
 - 2. La source d'énergie de l'expérience

- II Critères de construction du banc de condensateur
 - 1. Choix de la valeur de l'inductance du banc
 - 2. Conséquences du choix effectué

- III Principe de fonctionnement du banc
 - 1. Le déclenchement
 - 1.a) Le maître-éclateur déclenche un éclateur
 - 1.b) La chaîne de déclenchement est complète
 - 2. Les interrupteurs
 - 3. Sécurités sur le fonctionnement

DEUXIEME PARTIE

- I Implantation générale du banc

- II Caractéristiques techniques des éléments du banc
 - 1. Le condensateur
 - 2. Les interrupteurs
 - 3. Le câble d'énergie
 - 4. Le câble de déclenchement
 - 5. Les résistances liquides

III Montages mécaniques et électriques

1. Essais du micares
2. Isolements électriques
3. Fixation du câble d'énergie sur une borne du condensateur

IV Sondes de mesure

1. Mesure du courant
2. Mesure de la tension

V Retards et jitters pour différents montages

1. Résultats obtenus pour un module du banc
 1. a) Chaîne de déclenchement composée d'un maître-éclateur et d'un éclateur.
 1. b) Chaîne de déclenchement complète
2. Fonctionnement simultané de deux modules du banc

VI Plage de fonctionnement vis-à-vis de la tension

1. L'éclateur
2. Le sous-maître-éclateur

VII Vérification du fonctionnement des éclateurs : synchronisme du banc

1. Utilisation de fibres optiques
2. Utilisation de sondes magnétiques

VIII Mise au point des résistances liquides

IX Principales caractéristiques du banc de condensateurs

CONCLUSION

INTRODUCTION

Les études menées à Limeil^{1,2} depuis plusieurs années sur les expériences de plasma de type Focus ont montré que les émissions de rayons X et de neutrons sont respectivement associées à des faisceaux intenses d'électrons et d'ions. Ces faisceaux apparaissent au sein du plasma comme la conséquence d'une phase turbulente pendant laquelle le plasma présente une résistance "anormale" liée au développement d'instabilités microscopiques.

Une installation de 340 kJ sous 40 kV, délivre dans la chambre à plasma un courant de 2 MA en un temps de 5 μ s. Les caractéristiques des faisceaux sont pour cette machine :

	E	W	P
ions	300 - 400 keV	10 - 15 kJ	0,2 10^{12} - 0,4 10^{12} W
électrons	200 - 300 keV	10 - 15 kJ	0,4 10^{12} - 0,8 10^{12} W

L'étude de l'interaction plasma-courant électrique qui a été effectuée sur une plage s'étendant de 20 à 2000 kA pour des machines fonctionnant essentiellement à 40 kV a permis de dégager le point important suivant : la résistance R atteinte par le plasma avant l'apparition des faisceaux de particules est en première approximation indépendante de la valeur du courant I circulant dans la décharge et prend une valeur comprise entre 0,2 et 0,4 ohm.

La différence de potentiel aux bornes de la colonne de plasma V_p atteint en conséquence une valeur maximale proportionnelle au courant de la décharge (celui-ci demeure pratiquement constant pendant la croissance de la résistance).

$$V_p = RI$$

De plus, l'énergie moyenne des électrons et des ions reste à peu près égale à v_p . Et la puissance que l'on retrouve dans les faisceaux représente environ 30 à 40 % de la puissance électrique maximum délivrée par le générateur, donc croît comme I^2 .

Il ressort clairement de ces considérations que l'extrapolation des caractéristiques des faisceaux de particules s'effectue en augmentant le courant qui circule dans la décharge. Ceci augmente en conséquence les tensions créées par le plasma et il est donc nécessaire de disposer d'une technologie à très haute tension avec des isollements renforcés. C'est ce que permet de faire le banc de condensateurs dont nous présentons dans ce rapport la mise au point sur des sous-ensembles. Tout en préservant la possibilité d'extension à une énergie supérieure nous avons choisi dans un premier temps une énergie de 380 kJ à 80 kV.

Notons que la technologie mise en oeuvre à cette occasion reprend celle des meilleures réalisations étrangères comme les bancs de Los Alamos et de Frascati.³

On peut estimer que ce banc délivrerait au plasma un courant deux fois plus important que l'installation actuelle. Ce qui permet d'envisager des flux de rayonnement X ainsi que des caractéristiques de faisceaux de particules nettement accrus.

PREMIERE PARTIE

I - L'expérience Focus

1. Description

Le montage expérimental consiste en un canon coaxial placé dans une enceinte remplie de deutérium à une pression de quelques torrs.

L'application de la tension entre les électrodes du canon coaxial, au niveau du manchon isolant qui sépare ces électrodes, est suivie d'un claquage dans le gaz froid et de la formation d'une nappe de courant. Sous l'action des forces de Laplace, la nappe de courant se déplace dans le canon, converge vers l'axe des électrodes et produit devant l'électrode centrale un plasma dense ($n \approx 10^{19}$ particules.cm⁻³) à très haute température ($T \approx 700$ eV).

2. La source d'énergie de l'expérience

C'est dans la majorité des cas un banc de condensateurs. Celui-ci doit transférer l'énergie qu'il stocke à la charge d'inductance variable que constitue la nappe de courant. Le transfert doit intervenir de façon rapide et avec le meilleur rendement possible.

Les paramètres importants sont :

- l'énergie stockée dans le banc W_0
- sa tension d'utilisation U_0
- sa capacité C
- son inductance L_0

Les problèmes électrotechniques sont ceux que posent :

- la haute tension (80 kV)
- les forts courants (plusieurs méga-ampères)
- la commutation simultanée de l'énergie de tous les condensateurs.

L'adaptation de la chambre à plasma au banc de condensateurs s'effectue par l'ajustement :

- du diamètre de l'anode, choisi de telle sorte que la densité du courant à sa surface reste inférieure à $50 \cdot 10^5 \text{ A m}^{-2}$ (valeur déterminée par M. Coudeville ⁵) ;
- du diamètre de la cathode, l'espace inter-électrode devant avoir une valeur minimale (3 à 4 cm) ;
- de la longueur des électrodes et de la pression de remplissage de l'enceinte, de façon à ce que le courant soit maximum au moment où débute la phase de striction de la nappe de courant.

II - Critères de construction du banc de condensateurs

Pour des condensateurs donnés, la tension d'utilisation étant fixée, le paramètre à déterminer est l'inductance totale du banc. De la valeur retenue dépendra en effet la qualité du transfert de l'énergie.

1. Choix de la valeur de l'inductance du banc

L'extrapolation des machines Focus s'effectue en fonction du courant qui circule dans la nappe.

La valeur atteinte par le courant est une fraction du courant maximum calculé en ne tenant pas compte de l'inductance du canon coaxial :

$$I = A \cdot I_{\text{MAX}} = A \sqrt{\frac{2W_0}{L_0}}$$

Mais le paramètre A prend une valeur d'autant plus grande que la valeur prise par un second paramètre B est plus petite (se rapporter à la référence 4).

$$B = \frac{\frac{\mu_0}{2\pi} V_s \text{Log} \frac{R_2}{R_1}}{2 \sqrt{\frac{L_0}{C}}}$$

V_s : Vitesse de la nappe de courant

R_1, R_2 : Rayons des électrodes.

Il résulte de ceci la nécessité d'effectuer un choix sur la valeur de L_0 de façon, soit à utiliser la plus grande part possible d'un courant non optimisé, soit à utiliser une part plus faible d'un courant rendu maximum.

La valeur de L_0 joue par ailleurs un rôle important dans le temps de montée du courant. La dérivée par rapport au temps du courant lors de la phase de claquage est en première approximation :

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_0 \sim \frac{U_0}{L_0}$$

Une valeur faible de L_0 implique donc une valeur importante pour $\left(\frac{di}{dt}\right)_0$, c'est-à-dire un temps de montée court pour le courant de la décharge.

Cet aspect du problème étant également intéressant, nous avons choisi pour L_0 une valeur aussi faible que possible, en faisant en sorte de maintenir le coût de l'installation à un prix raisonnable.

2. Conséquences du choix effectué

L'énergie stockée dans le banc de condensateur se retrouve sous forme d'énergie utile dans la nappe de courant en mouvement et dans les parties inductives du circuit. Une faible valeur de L_0 impliquera que cette énergie se retrouve essentiellement dans le canon coaxial, là où elle est utilisée.

La fermeture des éclateurs entraîne la présence d'oscillations parasites dans le circuit de décharge, ces parasites altèrent les signaux de courant et de tension qui nous permettent d'observer le fonctionnement de l'expérience. La recherche d'une faible valeur de L_0 implique des lignes de transfert de l'énergie qui soient courtes et dans lesquelles les signaux parasites s'atténueront rapidement.

III - Principe de fonctionnement du banc

Le banc de condensateurs se compose de 64 modules élémentaires comprenant chacun ⁶:

- un éclateur (voir le schéma de la figure n°1a) ;
- un condensateur ;
- un câble d'énergie reliant le condensateur au connecteur de la chambre à plasma.

Les 64 éclateurs sont déclenchés par huit sous-maitre-éclateurs, eux-mêmes déclenchés par un maître-éclateur.

1. Le déclenchement

Le système de déclenchement repose sur la décharge des lignes coaxiales qui réunissent le maître-éclateur aux sous-maitre-éclateurs et les sous-maitre-éclateurs aux éclateurs. L'ensemble du système de déclenchement est mis au potentiel de la masse pendant la décharge des condensateurs.

1.a) Le maître-éclateur déclenche un éclateur

Le montage est schématisé sur la figure 2a.

La ligne coaxiale est chargée au potentiel $-\frac{2U_0}{5}$. La fermeture du maître-éclateur est à l'origine de la propagation dans la ligne d'une onde de tension d'amplitude $+\frac{2U_0}{5}$, qui, parvenue dans

l'éclateur se réfléchit en conservant son signe. La variation de tension en cet instant est égale à $\frac{4U_0}{5}$ et est utilisée pour déclencher l'éclateur.

L'éclateur étant amorcé, la borne du condensateur, initialement portée à un potentiel négatif $-U_0$ est instantanément ramenée au potentiel de la masse. Un potentiel égal au précédent mais positif $+U_0$ est appliqué entre la seconde borne du condensateur et la masse. L'enceinte Focus est alors alimentée en tension puis en énergie après que se soit produit un claquage entre les deux électrodes du canon coaxial.

1.b) La chaîne de déclenchement est complète

Le montage est schématisé sur la figure n°2b.

La ligne coaxiale qui réunit le maître-éclateur au sous-maître-éclateur est chargée au potentiel $-\frac{4U_0}{25}$, la ligne coaxiale qui réunit le sous-maître-éclateur à l'éclateur est chargée au potentiel $-\frac{2U_0}{5}$. Suivant le principe décrit au paragraphe précédent, le maître-éclateur déclenche le sous-maître-éclateur qui, à son tour, déclenche l'éclateur.

2. Les interrupteurs

Dans tous les interrupteurs le diélectrique est un gaz. Le maître-éclateur ne comporte que deux électrodes et est déclenché par décompression durant nos essais. Il pourra être déclenché suivant un processus plus élaboré dans un second temps. Le sous-maître-éclateur et l'éclateur possèdent trois électrodes concentriques. L'électrode intermédiaire ou de déclenchement est reliée au câble de déclenchement, elle est donc polarisée aux $\frac{2}{5}$ de la tension de l'électrode haute-tension. De façon à ce que la perturbation, apportée par l'électrode de déclenchement au champ électrique existant entre l'électrode haute-tension (intérieure) et l'électrode de masse (extérieure), soit minimale avant le déclenchement, celle-ci est placée de telle façon que si d est la somme des distances inter-électrodes, il y ait une

distance de $\frac{3d}{5}$ entre l'électrode de déclenchement et l'électrode haute-tension, et $\frac{2d}{5}$ entre l'électrode de déclenchement et l'électrode de masse.

Au moment du déclenchement, l'impulsion de tension qui parvient à l'électrode de déclenchement augmente son écart de tension avec l'électrode haute-tension (de deux fois la valeur de la polarisation) alors qu'elle ne le modifie qu'en signe avec l'électrode de masse. Le claquage se produit en premier lieu entre les deux électrodes centrales avant de parvenir jusqu'à l'électrode de masse.

Le temps de fermeture de ces éclateurs étant en première approximation proportionnel à $\frac{(\text{Pression remplissage})^{3/2}}{(E \text{ électrique déclenchement})^{4/3}}$ leur

bon fonctionnement est à rechercher vers les champs électriques forts et en conséquence vers les espacements inter-électrodes faibles.

Le choix de la polarisation de l'électrode de déclenchement aux $\frac{2}{5}$ de la haute-tension est la valeur la plus couramment adoptée compte tenu de la nécessité d'obtenir un temps de fermeture qui soit court et un taux de mauvais déclenchement qui soit faible.

Les variations d'impédance inhérentes au raccordement du câble coaxial à l'électrode de déclenchement, ont pour effet une altération du front de montée des échelons de tension transmis dans les câbles. Dans notre montage ces perturbations durent quelques nanosecondes.

3. Sécurités sur le fonctionnement

Celles-ci sont essentiellement :

- Un filtre anti-retour sur l'alimentation haute-tension

Celui-ci permet l'isolement du circuit de charge dans le cas où un incident surviendrait au cours de la charge. Il est constitué par deux cellules R - C en série (R \approx 1000 Ω et C \approx 10⁻⁶ F) ;

.../...

- Une terre de choc

Elle fixe le potentiel de la masse et doit permettre l'écoulement de l'énergie utilisée. Sa résistance doit rester inférieure à 1Ω et son inductance doit être la plus faible possible ;

- Des résistances liquides

Elles sont placées en série sur le circuit de charge à raison d'une résistance liquide par condensateur. Elles peuvent absorber individuellement l'énergie totale du banc dans le cas où un court-circuit se produirait dans un condensateur pendant la charge. Ce sont des résistances de 4Ω , valeur suffisamment élevée pour ne pas gêner le phénomène résistif survenant au cours de l'expérience.

Une résistance liquide identique est placée en parallèle sur la tête Focus entre l'anode et la cathode. Son rôle est de permettre la charge des condensateurs et d'absorber l'énergie du banc en cas de mauvais fonctionnement.

L'absorption par l'une de ces résistances de l'énergie totale du banc n'élèverait la température de la solution qu'elle contient que d'une quinzaine de degrés.

DEUXIEME PARTIE

I - Implantation générale du banc

Celle-ci est schématisée sur la figure n°3.

Les condensateurs, regroupés par quatre, sont placés dans la position verticale (sur un cercle de 3,90 m de diamètre) autour de la tête Focus dont l'axe est également vertical.

Les interrupteurs sont situés sous les condensateurs. Les câbles d'énergie longs de 3,65 m, partent de l'extrémité haute des condensateurs et se trouvent au niveau du connecteur auquel ils sont rattachés (2,85 m du sol).

II - Caractéristiques techniques des éléments du banc

1. Le condensateur

Le condensateur a été réalisé à notre demande, par la société Haefely. Les deux bornes du condensateur sont isolées de son armature.

- Capacité : $C = 1,87 \mu\text{F} \pm 10 \%$
- Inductance : $L = 65 \text{ nH}$
- Dimensions hors tout : 1,132 m x 0,445 m x 0,440 m
- Poids : 355 kg.

2. Les interrupteurs

Le corps de tous les interrupteurs est une pièce cylindrique moulée, en AU5GT (alliage dont la composition comprend de l'Aluminium pour 94 % et du cuivre pour 4 à 5 %).

Son diamètre est de 285 mm et sa longueur de 250 mm. Il est testé en pression jusqu'à 15 bars.

Les électrodes des interrupteurs sont en cunitène , alliage de tungstène (93 %), de nickel (5 %) et de cuivre (2 %). L'inductance propre de l'éclateur est d'environ 40 nH.

3. Le câble d'énergie

Le câble d'énergie a été réalisé à notre demande par la société "Câbles de Lyon" afin de résister à des surtensions de l'ordre de 200 kV.

Du centre vers l'extérieur, il comprend :

- 1 jonc de polyéthylène percé en son centre $\phi 17$ mm
- 1 conducteur central composé de 105 fils de 0,5 mm de diamètre (Cu)
 $\phi 18$ mm
- 1 couche de polyéthylène semi-conductrice $\phi 20$ mm
- 1 couche de polyéthylène $\phi 33$ mm
- 1 ruban de carbone
- 1 tresse de cuivre $\phi 34,8$ mm
- 1 ruban de mylar $\phi 34,9$ mm
- 1 gaine de polychlorure de vinyle $\phi 39$ mm

Le rayon de courbure minimum est égal à 50 cm. Ses caractéristiques électriques sont :

- . impédance caractéristique $Z_c = 21 \Omega$
- . self-inductance $L = 135$ nH/m
- . capacité $C = 306$ pF/m

4. Le câble de déclenchement

Son diamètre extérieur est de 22 mm, son âme centrale en cuivre a un diamètre de 2,65 mm.

Ses caractéristiques électriques sont :

- . impédance caractéristique $Z_c = 75 \Omega$
- . self-inductance $L = 375 \text{ nH/m}$
- . capacité $C = 67 \text{ pF/m}$
- . dans les conditions d'utilisation son affaiblissement est de l'ordre de $\beta = 0,5 \text{ dB/100 m}$

Il est fabriqué par la société Filotex sous la référence RG 164 U.

5. Les résistances liquides

Ce sont des réservoirs cylindriques en PVC d'une contenance de 10 litres. La distance qui sépare les deux électrodes en cuivre est de 300 mm. Ils sont remplis avec de l'eau distillée dans laquelle sont dissous des cristaux de sulfate de cuivre.

III - Montages mécaniques et électriques

Les montages les plus délicats sont ceux sur lesquels est appliquée la tension maximale (100 kV). Ce sont donc les deux bornes du condensateur et le raccordement du câble d'énergie sur le connecteur de la tête Focus.

Dans ce dernier cas la tension est maintenue par contournement le long du câble qui est dénudé sur une longueur de 66 cm. La surtension, au moment de l'augmentation de résistance du plasma, pouvant atteindre des valeurs importantes (200 - 300 kV pendant quelques dizaines de nanosecondes), un remplissage sous pression a été prévu à cet endroit de façon à augmenter l'isolement s'il était insuffisant à la pression atmosphérique.

En ce qui concerne les bornes des condensateurs les montages, faiblement inductifs, sont plus compacts et en conséquence plus difficiles à réaliser. Nous avons essayé plusieurs solutions pour chacun d'eux.

.../...

1. Essais du MICARES

Aussi bien du côté interrupteur que du côté câble d'énergie des pièces isolantes sont rapportées sur les bornes des condensateurs. Nous obtenons ainsi les géométries nécessaires aux montages. Les bornes sont elles-mêmes en micares, ce matériau possédant des propriétés intéressantes, tant du point de vue isolement électrique que du point de vue fabrication (la mise en forme est réalisée par un moulage des pièces), il était séduisant de donner directement aux bornes des condensateurs les géométries voulues. Ceci permettait de supprimer, au niveau de chacune des bornes, un isolement électrique.

Les essais que nous avons effectués n'ont pas été concluants puisque par trois fois la pièce en micares a été contournée par le courant à l'intérieur de l'éclateur (voir figure n°4). Cette solution a donc été abandonnée.

Nous sommes revenus à la solution des pièces rapportées, soit : une pièce en téflon du côté interrupteur et une pièce en polyéthylène du côté câble d'énergie.

2. Isollements électriques

Ils sont à réaliser en deux endroits :

- au niveau des jonctions pièces isolantes - bornes des condensateurs ;
- le long du câble d'énergie.

Deux solutions distinctes ont été essayées dans les deux cas. Les schémas correspondants sont représentés sur les figures n°1b et 1c.

Utilisation de joints en silicone

Ceux-ci peuvent être cylindriques et massifs, ils sont alors coulés en respectant des cotes précises et sont montés avec une compression de quelques dixièmes de millimètre. Ou bien ce sont

des joints toriques de fabrication courante qui sont comprimés de deux ou trois millimètres.

La seconde méthode est de mise en oeuvre plus aisée et s'est révélée aussi fiable que la première. Elle nécessite cependant, pour ce qui est de la tenue de la tension le long du câble d'énergie, une plus grande préparation de ce câble (reprise au tour du diamètre extérieur de l'isolant sur une quinzaine de centimètres).

Utilisation d'un isolant liquide

Cette technique a été utilisée avec satisfaction au niveau du raccordement câble d'énergie. condensateur. Elle permet de tenir la tension à la fois au niveau de la borne et au niveau du câble, la connection est en effet noyée dans l'isolant liquide. Le montage mécanique est alors de réalisation plus simple mais il est moins facilement démontable.

L'isolant liquide est le polycétrène D100 de la société PRODELEC, c'est une huile de synthèse obtenue par alkylation sélective du benzène.

Notons que les fluorocarbonés sont incompatibles avec les micares dont ils modifient les propriétés.

3. Fixation du câble d'énergie sur une borne du condensateur

Nous avons expérimenté un système à pince qui présentait l'avantage d'être aisément démontable, mais celui-ci a cédé après 1350 décharges du condensateur.

Nous sommes donc passés à une fixation mécanique à vis, plus rigide et de même encombrement.

Tous les montages cités dans ce paragraphe ont été éprouvés sur au moins un millier de décharges, les solutions possibles l'ont été sur trois milliers ou plus. Les essais ont été effectués avec un courant supérieur de 20 % à celui prévu dans les conditions normales d'utilisation. De même la tension de charge des condensateurs était de 90 kV au lieu de 80 kV, dans la plupart des essais.

IV - Sondes de mesure

1. Mesure du courant

Une mesure inductive à l'aide de sondes magnétiques nous permet d'obtenir la dérivée par rapport au temps du courant qui circule dans le circuit de décharge des condensateurs.

2. Mesure de la tension

Nous utilisons des diviseurs résistifs de deux types :
des diviseurs Haefely dont le temps de montée est d'environ 15 ns ;
- un diviseur CEA dont le temps de montée est inférieur à 5 ns.
Celui-ci a été réalisé et mis au point à la section ROE du service H.D.E. par Monsieur Boutry.

Nous utilisons aussi des sondes capacitatives que nous montons sur les câbles de déclenchement et dont le temps de montée est de l'ordre de la nanoseconde.

Ces diviseurs et ces sondes permettent de mesurer les caractéristiques des éclateurs ; retards et jitters.

Les signaux obtenus sont représentés sur la figure n°5.

Afin de mettre en évidence les jitters des interrupteurs nous avons, soit effectué la somme de plusieurs signaux (figure n°5a), soit utilisé un top de chronométrie déclenché par le départ du maître-éclateur (figures 5b à 5f). C'est la première solution qui est représentée sur les figures n°9, 10 et 12.

En plus de ces moyens de mesure nous avons employé des fibres optiques qui nous ont permis de comparer l'apparition des signaux lumineux émis par les interrupteurs. Ceux-ci ont été observés grâce à des photomultiplicateurs (voir la figure n°6).

V - Retards et jitters pour différents montages

Tous les isollements sont préalablement testés en tension jusqu'à 110 kV, valeur que nous maintenons pendant une minute. A cette fin nous appliquons la tension simultanément sur les deux bornes du condensateur, celui-ci ne se charge donc pas.

Le diélectrique gazeux utilisé pour maintenir l'isolement entre les électrodes dans les éclateurs est de l'air comprimé desséché et filtré. Les circuits d'alimentation de l'éclateur, du sous-maître-éclateur et du maître-éclateur sont indépendants.

1. Résultats obtenus pour un module du banc

Un tel module comprend un éclateur, un condensateur et un câble d'énergie. Le déclenchement est tout d'abord simplifié, l'éclateur étant déclenché directement par le maître-éclateur. Le sous-maître-éclateur sera par la suite inclus dans la chaîne de déclenchement.

Le condensateur est déchargé dans un circuit inductif qui comprend une ligne plate simulant le raccord du câble d'énergie à la tête Focus et une boucle constituant l'inductance complémentaire nécessaire à l'établissement dans le circuit d'un courant d'environ

85 kA à 80 kV, soit une valeur supérieure à celle calculée pour les conditions normales d'utilisation sur plasma.

1.a) Chaîne de déclenchement composée d un maître-éclateur et d'un éclateur (voir figure n°2a)

Le maître-éclateur est déclenché par dépression, il est équipé de ses huit câbles de déclenchement dont sept sont libres et dont le huitième est relié à l'éclateur. La tension de charge du condensateur est 90 kV. La distance inter-électrodes entre masse et haute tension est 10 mm. La pression d'air dans l'éclateur est 5,5 bars..

Le retard au déclenchement de l'éclateur est estimé par deux méthodes indépendantes :

- en comparant les temps d'apparition des signaux provenant d'un diviseur de tension placé à l'extrémité libre d'un câble de déclenchement et d'une sonde magnétique située sur le circuit de décharge du condensateur ;
- en comparant les départs des signaux fournis par les fibres optiques placées dans le maître-éclateur et dans l'éclateur.

Dans les deux cas nous obtenons un retard de l'ordre de 15 ns.

Le jitter de l'éclateur est obtenu en superposant les signaux du diviseur de tension et de la sonde magnétique pour plusieurs décharges (un signal de ce type est représenté sur la figure n° 5a). Le jitter constaté est d'environ 3 ns.

1.b) Chaîne de déclenchement complète

Le maître-éclateur est déclenché par dépression. Le maître-éclateur et le sous-maître-éclateur sont équipés de leurs huit câbles de déclenchement. La tension de charge du condensateur est 90 kV. Les distances totales inter-électrodes sont 3,5 mm dans le sous-maître-éclateur et 10 mm dans l'éclateur. Les pressions d'air sont de 4,2 bars

dans le sous-maitre-éclateur et de 5,5 bars dans l'éclateur.

Retards du sous-maitre-éclateur et de l'éclateur

Pour le sous-maitre-éclateur nous comparons les temps d'apparition :

- des signaux provenant des diviseurs de tension placés aux extrémités des câbles de déclenchement du maître-éclateur et du sous-maitre-éclateur. Nous montrons les signaux obtenus et leur forme théorique sur la figure n°7.;
- des signaux des sondes capacitives placés entre le maître-éclateur et le sous-maitre-éclateur pour l'une, entre le sous-maitre-éclateur et l'éclateur pour l'autre. Ce sont les signaux des figures 5e et 5f. Ils sont également représentés sur la figure n°8. Des temps de balayage différents nous permettent alors d'observer, sur ces signaux, les départs des interrupteurs.;
- des signaux fournis par les fibres optiques placées dans le maître-éclateur et dans le sous-maitre-éclateur.

Pour l'éclateur nous procédons avec les mêmes méthodes qu'au paragraphe précédent.

Les retards des deux types d'interrupteurs sont comparables et de l'ordre de 15 ns.

Ils sont inférieurs aux temps de montée des signaux de déclenchement, ce qui assure un fonctionnement reproductible du déclenchement.

Jitter du sous-maitre-éclateur et de l'éclateur

Le jitter total est de l'ordre de 10 ns, il provient pour les trois-quarts du sous-maitre-éclateur et pour un quart de l'éclateur. Ces différents jitters sont montrés sur la figure n°9.

La valeur de 10 ns est satisfaisante car inférieure au temps mis par un signal électrique pour effectuer un aller et retour dans les câbles qui relient les condensateurs au connecteur de l'expérience Focus, soit 35 ns.

Remarque sur les prises de déclenchement

Un autodéclenchement de notre installation a pu trouver son origine dans un contournement, par la tension, des prises de raccordement des câbles de déclenchement sur le sous-maitre-éclateur. Les impulsions très courtes, de grande amplitude, dues aux départs des éclateurs (voir figure n°9) lors d'un fonctionnement correct du système, provoquaient une altération en surface des isolants. La tenue en tension de ces derniers devenait insuffisante, et un autodéclenchement pouvait survenir. Nous avons remédié à cet inconvénient en augmentant la distance de contournement au niveau des isolants et en changeant le matériau qui permettait de les fabriquer. De ce point de vue un mauvais contact entre la prise de charge et l'électrode centrale du sous-maitre-éclateur est à éviter absolument.

Influence de la longueur des câbles de déclenchement

Dans le but d'étudier l'influence de la longueur de ces câbles sur la qualité du déclenchement nous avons travaillé avec des câbles de 6 m et de 20 m alternativement entre le maitre-éclateur et le sous-maitre-éclateur ainsi qu'entre le sous-maitre-éclateur et l'éclateur. Les différences constatées tant en ce qui concerne les retards que les jitters sont pratiquement nulles, ce que l'on voit sur la figure n°10.

Rinçage des éclateurs

Nous avons pu remarquer au cours de tous ces essais la nécessité de rincer les interrupteurs (sous-maitre-éclateur et maitre-éclateur) après chaque fonctionnement sous peine que se produise un autodéclenchement dans l'un de ces appareils.

2. Fonctionnement simultané de deux modules du banc

Le schéma de ce montage est représenté sur la figure n°11. Un deuxième module, identique au premier, est également déclenché par le sous-maître-éclateur. Le synchronisme des deux éclateurs s'effectue de façon très satisfaisante, le décalage constaté entre les signaux caractéristiques de leur fonctionnement étant au maximum égal à 3 ns. Les retards au déclenchement sont comparables à ceux que nous obtenions avec un seul éclateur. Il en est de même pour le jitter de ces ensembles qui est inférieur ou égal à 10 ns à 90 kV (voir figure n°12).

VI - Plage de fonctionnement vis-à-vis de la tension

Nous avons recherché les limites inférieure et supérieure de la tension auxquelles il est possible d'utiliser le banc dans de bonnes conditions. Les contraintes sont :

- la limite d'utilisation des condensateurs : 100 kV ;
- la pression maximale d'air admissible dans les éclateurs : 7 bars.

1. L'éclateur

Cet appareil admet des variations importantes de tension puisque son jitter ne varie pratiquement pas entre 45 et 100 kV. Pour un écartement inter-électrodes de 10 mm, sa pression de remplissage passe de 1,5 bars à 6,5 bars.

2. Le sous-maître-éclateur

Son fonctionnement est moins souple ; aussi pour couvrir la gamme de tension de l'éclateur, plusieurs écartements inter-électrodes (donc plusieurs jeux d'électrodes de déclenchement) sont-ils nécessaires. Pour conserver un jitter total (sous-maître-éclateur plus

éclateur) de l'ordre ou inférieur à 10 ns, trois jeux suffisent (voir figure n°13).

Pour une tension de charge des condensateurs de 30 kV le jitter total reste de l'ordre de 6 ns lorsque l'écartement inter-électrode dans le sous-maitre-éclateur est de 3 mm et sa pression de remplissage de 6,6 bars. Les jitters correspondants sont montrés sur la figure n°15.

VII - Vérification du fonctionnement des éclateurs : synchronisme du banc

Nous avons essayé deux méthodes distinctes et nous avons conclu sur leurs possibilités d'application.

1. Utilisation de fibres optiques

Les fibres transmettent une partie du flash lumineux des éclateurs jusqu'à l'objectif d'une caméra à balayage. Nous sommes parvenus à utiliser cette méthode et nous avons pu constater qu'elle permettait de vérifier avec une résolution de 5 ns le départ d'un éclateur. Nous montrons sur la figure n°14 qu'un retard au déclenchement de l'éclateur est aussi bien suivi avec une fibre optique qu'avec un signal électrique. L'intérêt de cette méthode réside dans le contrôle visuel et immédiat du bon fonctionnement d'un grand nombre d'éclateurs. Les fibres optiques peuvent en effet être juxtaposées sur la fente d'une caméra à balayage et deux caméras suffiraient dans notre cas.

Cependant ce moyen de contrôle n'a pas ici une efficacité de 100 % car le flux lumineux émis par l'éclateur en direction de la fibre n'est pas reproductible en intensité. Ce que nous avons vérifié avec un photomultiplicateur pour trois positions différentes de la fibre dans l'éclateur (voir la figure n°15).

2. Utilisation de sondes magnétiques

Cette méthode consiste à chronométrer, par rapport à un signal de référence, les décalages existant entre les signaux fournis par les sondes magnétiques placées sur les câbles d'énergie. Un tel signal est montré sur la figure n°15. Nous avons expérimenté cette méthode et constaté sa fiabilité. La précision obtenue est de quelques nanosecondes.

Le signal de référence est fourni par une sonde capacitive placée sur le câble de déclenchement qui relie le maître-éclateur au sous-maître-éclateur. Le chronomètre à huit voies que nous avons utilisé est le module TSH 530 de Thomson CSF. Les résultats sont donnés sous forme numérique (de tels tiroirs existent avec 16, 32 ou 64 voies).

Une vérification aisée du fonctionnement des sous-maître-éclateurs du banc peut être fondée sur ce principe, en chronométrant les signaux provenant de huit sondes capacitatives placées entre les sous-maîtres-éclateurs et les éclateurs à raison d'une sonde par sous-maître-éclateur.

VIII - Mise au point des résistances liquides

La valeur choisie pour ces résistances est d'environ 4Ω . Une concentration voisine de 170 g de CuSO_4 par litre d'eau est nécessaire pour parvenir à cette valeur à la température ambiante.

Nous avons effectué la mesure de la résistance avec un pont de Wheatstone fonctionnant en courant continu. Nous avons obtenu une confirmation de la mesure en plaçant une résistance liquide dans le circuit de décharge d'un condensateur et en déterminant les caractéristiques de ce circuit.

La résistance liquide qui est placée entre l'anode et la cathode du canon coaxial et qui doit permettre la charge des

condensateurs est soumise aux surtensions provenant de l'augmentation de résistance du plasma. Elle doit en conséquence résister à des surtensions de 200 à 250 kV, ce que nous avons vérifié en déchargeant le condensateur dans une résistance pour laquelle la distance séparant les électrodes en cuivre avait été ramenée de 300 à 200 mm.

IX - Principales caractéristiques du banc de condensateurs

- L'énergie stockée dans le banc est de 330 kJ à 80 kV. Il peut être utilisé jusqu'à 100 kV, son énergie est alors de 600 kJ.

- Calcul de son inductance :

L'inductance d'un module du banc provient :

. de l'éclateur	40 nH
. du condensateur	65 nH
. de la connexion borne du condensateur - câble d'énergie	50 nH
. du câble d'énergie	360 nH

Le banc comprend 64 modules identiques et son inductance y compris le connecteur de la tête Focus est :

$$L = \frac{40 + 65 + 50 + 360}{64} + 4,5 = 12,5 \text{ nH}$$

- Le courant délivré dans la nappe de plasma sera d'environ 4 MA et le courant atteindra sa valeur maximale en 2 μ s.

- Le jitter total sur le fonctionnement des interrupteurs, sous-maitre-éclateur et éclateur est d'environ 10 ns pour une tension de charge comprise entre 45 kV et 100 kV (voir la figure n° 15 les valeurs obtenues à 80 kV et vérifiées sur 500 décharges).

- Après que les éclateurs soient rendus conducteurs, le circuit de déclenchement se trouve en totalité au potentiel de la masse.

- Les condensateurs, les câbles d'énergie et de déclenchement sont fiables. Nous n'avons pas constaté de dégradation notable après 5000 décharges du condensateur.
- Les éclateurs fonctionnent avec de l'air comprimé et sans usure pénalisante des électrodes en cunitène.
- Le banc peut être installé dans un local dont les dimensions sont de 12,5 m sur 10 m, et de 4,5 m de hauteur sous plafond.

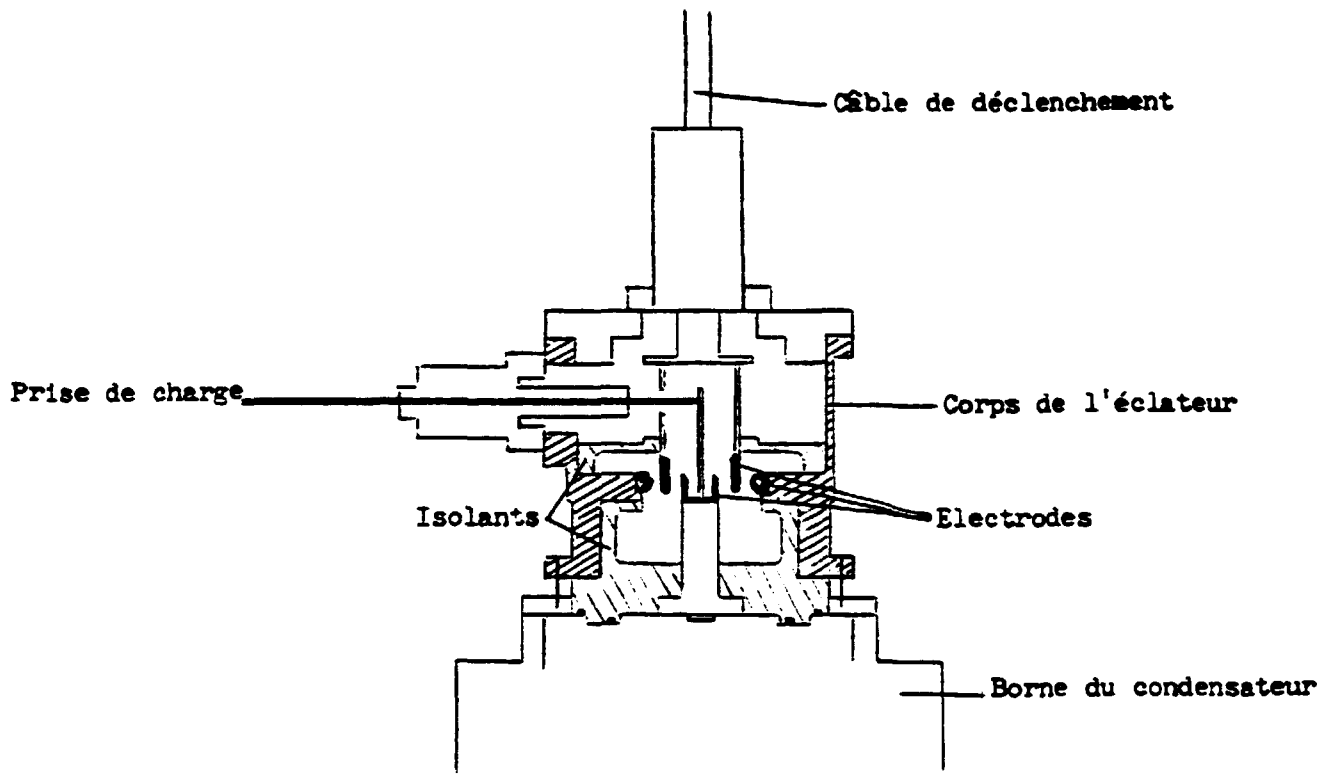
CONCLUSION

Les éléments sont réunis pour permettre la construction d'un banc de condensateur 380 kJ - 80 kV.

Le courant de l'expérience Focus qui serait alimenté par ce banc serait d'environ 4 MA et aurait un temps de montée de 2 μ s. Compte tenu des règles d'extrapolation de l'expérience, les caractéristiques du faisceau d'électrons du rayonnement X et du faisceau d'ions devraient se trouver augmentées d'un facteur 2 à 3 par rapport aux machines existant actuellement à Limeil.

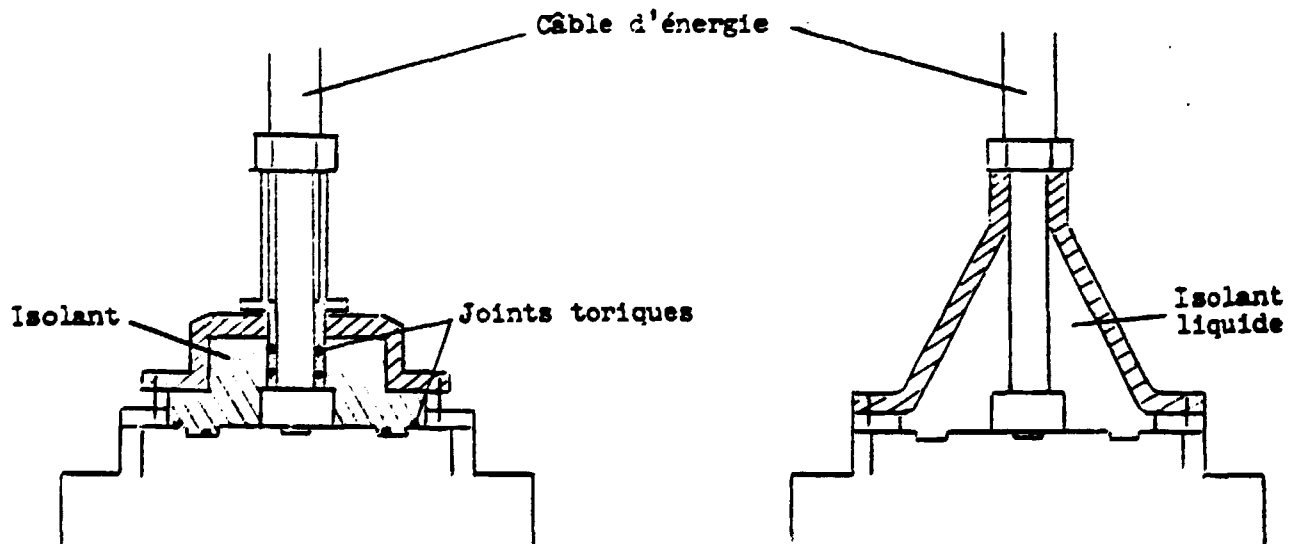
- REFERENCES -

- /1/ A. BERNARD, J.P. GARCONNET, A. JOLAS, J.P. LE BRETON and J. de MASCUREAU
Seventh International Conference on Plasma Physics and Controlled
Nuclear Fusion Research,
Innsbruck 1978.
- /2/ A. BERNARD, J.P. GARCONNET, A. JOLAS, J.P. LE BRETON and J. de MASCUREAU
IIth International Conference on Energy Storage, Compression and
Switching,
Venise, 5-8 Dec. 1978.
- /3/ E.L. KEMP, G.P. BOICOURT, R.F. GRIBBLE, C.F. HAMMER, K.W. HANKS,
W.E. QUINN et G.A. SAWYER
The design and installation of Scyllac, a 15 M theta-pinch experiment,
6th Symposium on Fusion Technology,
Aachen, Germany, September 22-25, 1970.
- C.F. HAMMER, H.W. HARRIS, W.E. QUINN, G.A. SAWYER, K.S. THOMAS and
E.L. KEMP
Scyllac, eighteen months later,
7th Symposium on Fusion Technology,
Grenoble, Oct. 24-27, 1972.
- G. GOURLAN, H. KROEGLER and Ch. MAISONNIER
A one megajoule fast condenser bank for the plasma Focus experiment
at Frascati,
International Conference on Energy Storage, Compression and Switching,
Asti-Torino, Italy, Nov. 5-7, 1974.
- /4/ "Dense plasma Focus"
Mather J.W. Methods of Experimental Physics
Plasma Physics, Vol. IX, Part B, (1971), p. 187.
- /5/ A. BERNARD, A. COUDEVILLE et J.P. WATTEAU
Neutron yield of a focus discharge in various experiments,
Physics Letters, Vol. 33 A, n° 8, (1970).
- /6/ C. NAZET
Préétude d'un banc 380 kJ - 80 kV
Rapport non publié.



1 a : Schéma de l'éclateur

liaison éclateur - borne du condensateur



1 b : liaison câble d'énergie
banc de condensateurs réalisée
avec des joints toriques

1 c : liaison câble d'énergie
banc de condensateurs réalisée
avec un isolant liquide

Figure n° 1 : Schémas de raccordement
des bornes du condensateur

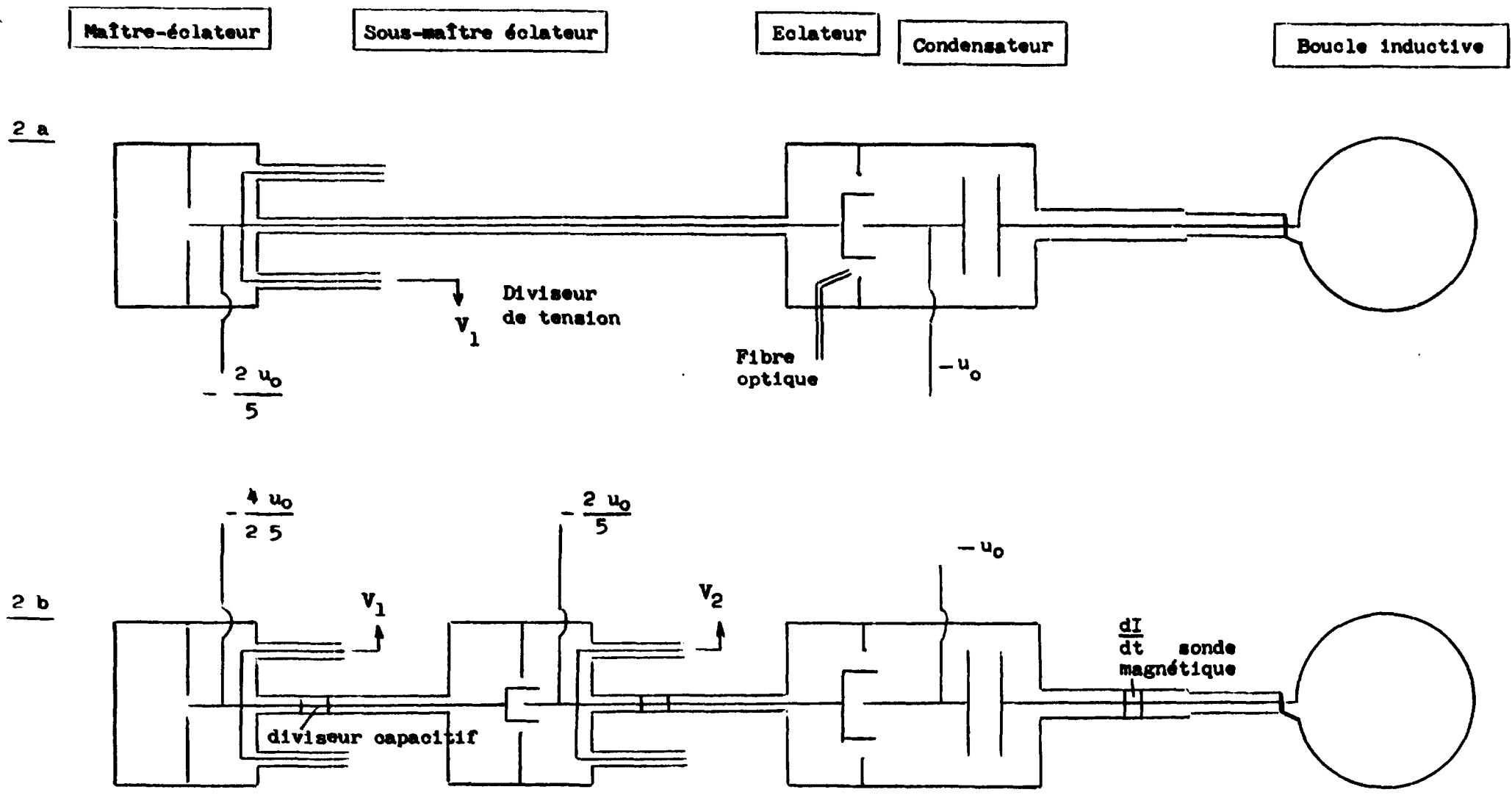


Figure n° 2 : Schéma du déclenchement par la décharge de lignes coaxiales

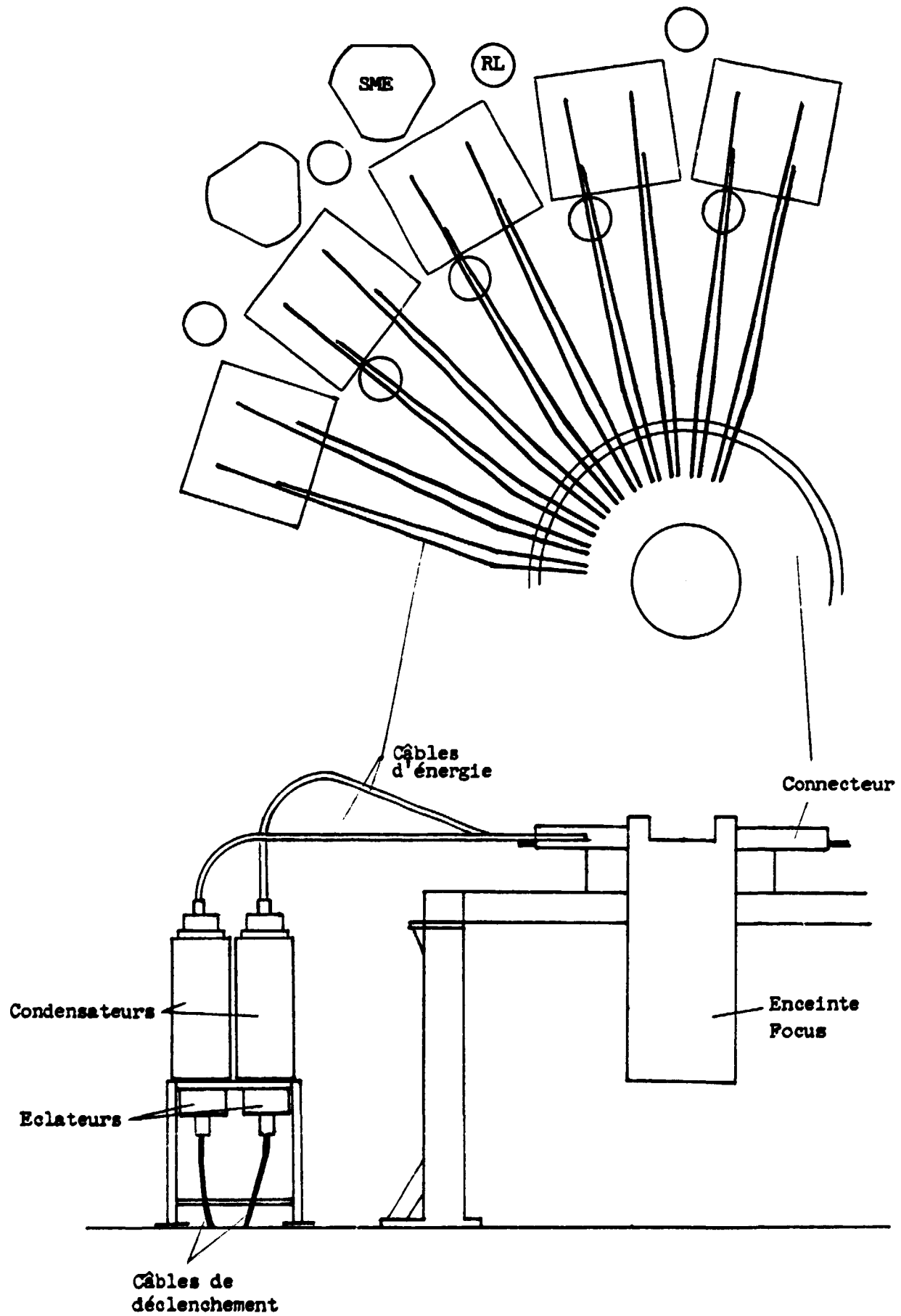


Figure n° 3 : Implantation du banc de condensateurs

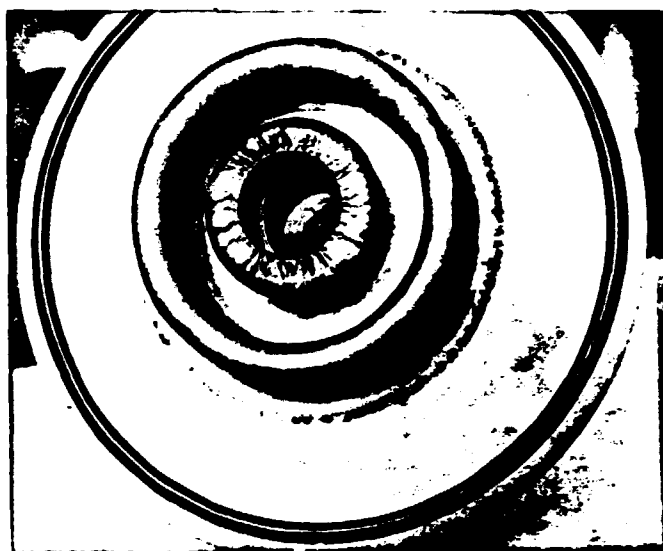
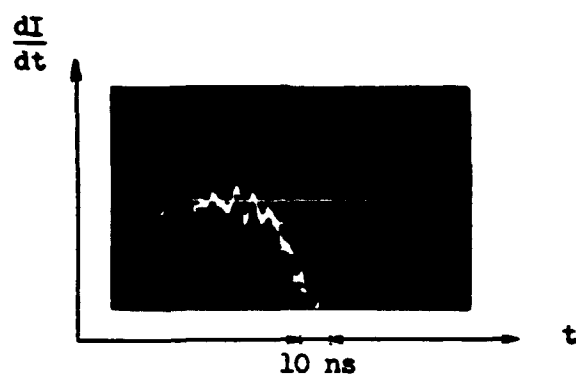


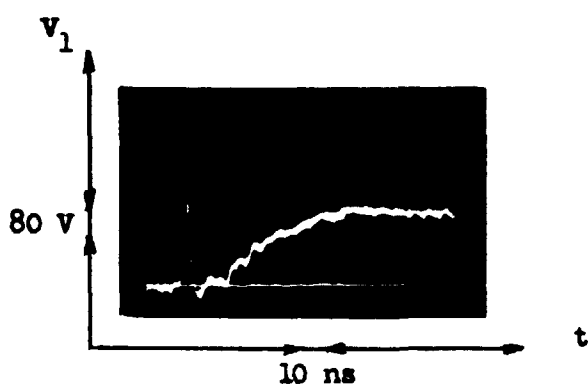
Figure n° 4 : Borne en micares détériorée par des
arcs en surface



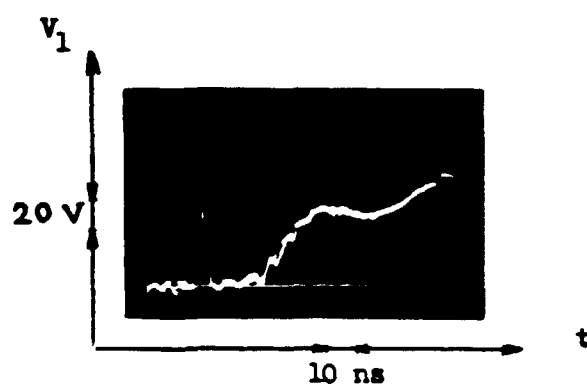
5 a : Addition des signaux
de sonde magnétique et
du diviseur Haefely



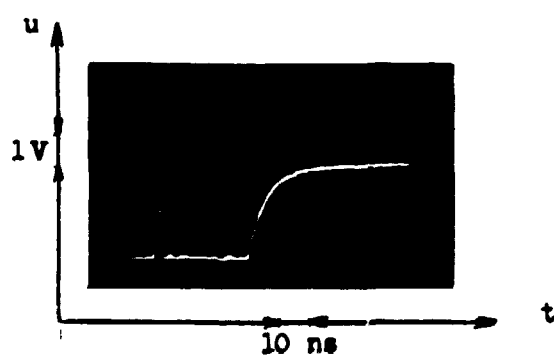
5 b : Sonde magnétique



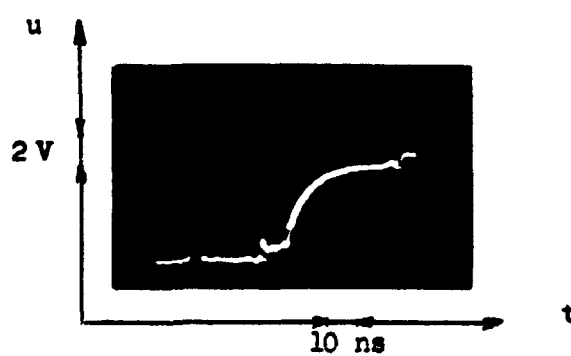
5 c : Diviseur Haefely
avant le SME



5 d : Diviseur CEA
avant le SME

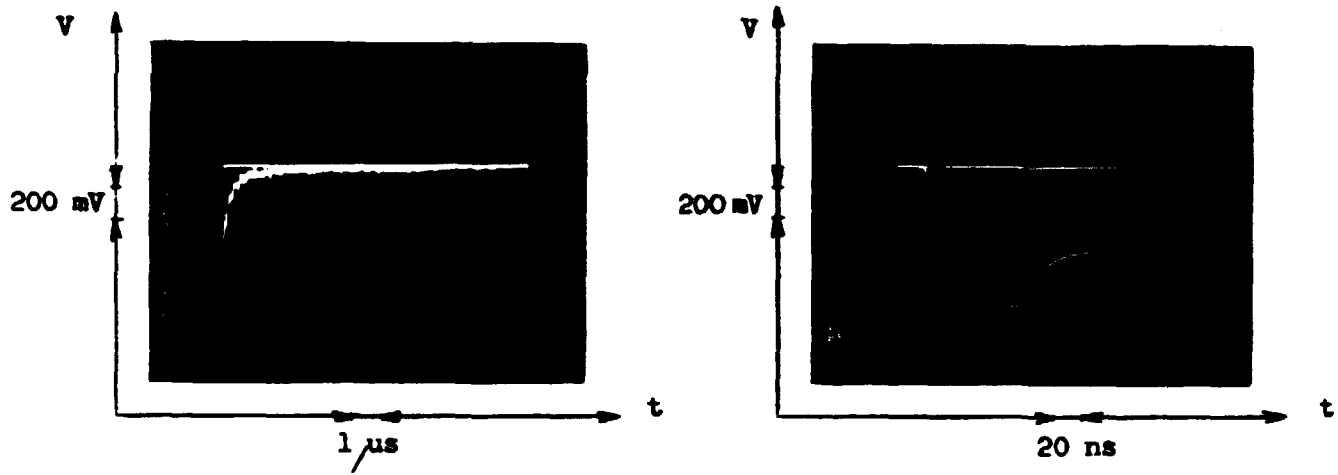


5 e : Sonde capacitive
entre ME et SME

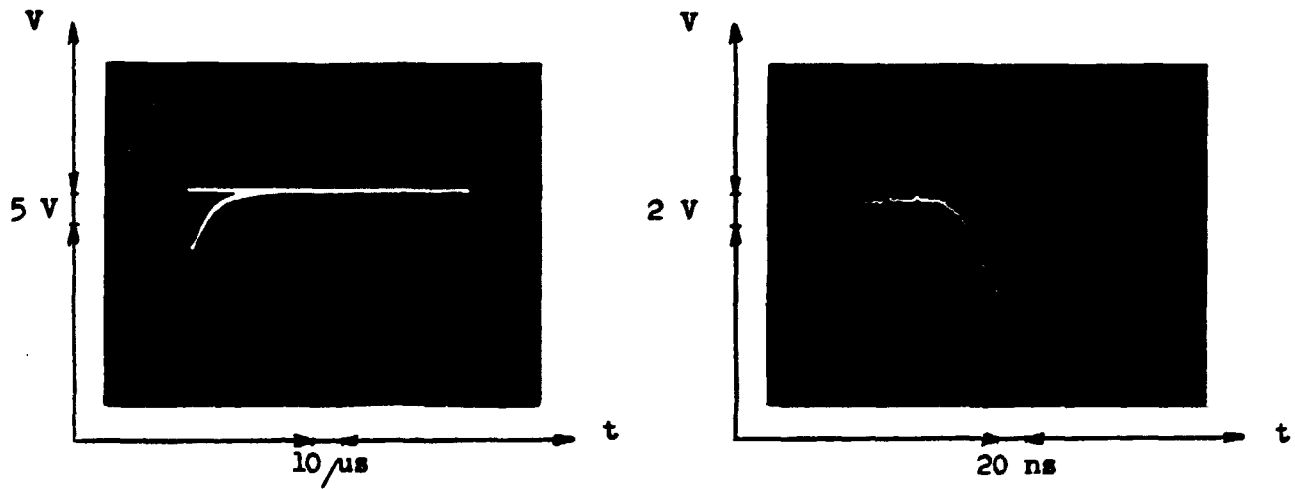


5 f : Sonde capacitive
entre SME et E

Figure n° 5 : Signaux électriques de différents capteurs
représentés sur le schéma de la figure 1.
(Les signaux de plusieurs décharges sont
superposés)

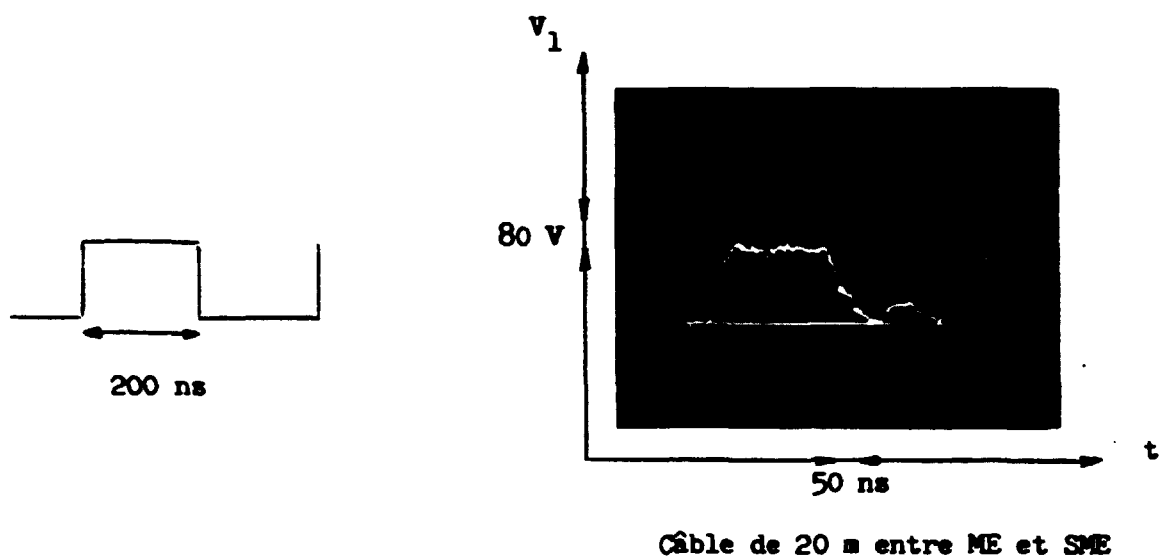


Signal lumineux du SME
PM 56 (1800 V)



Signal lumineux de E
PM 56 (1600 V)

Figure n° 6 : Signaux lumineux transmis par les fibres optiques et observés avec un photomultiplicateur



Signaux théoriques

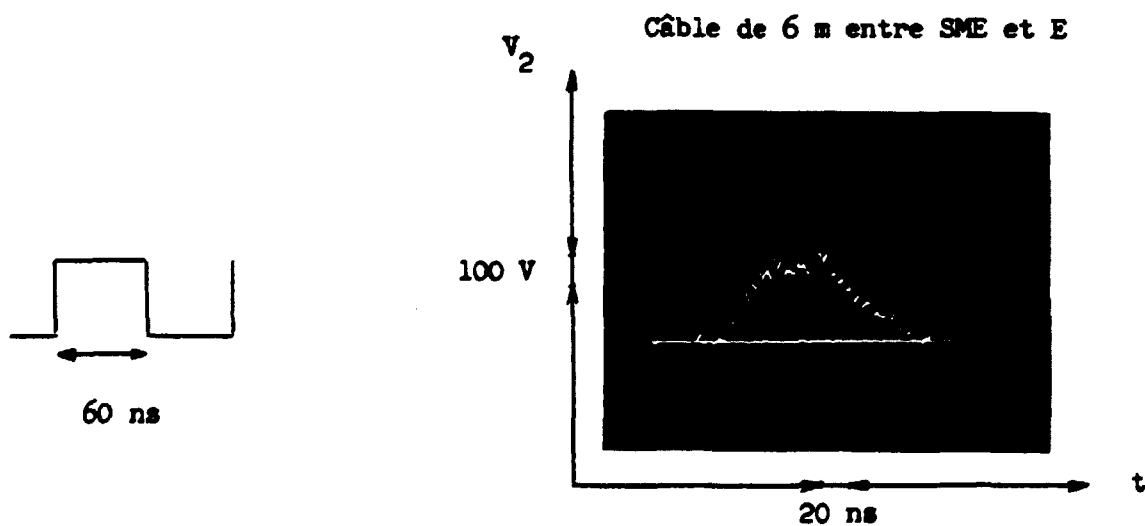
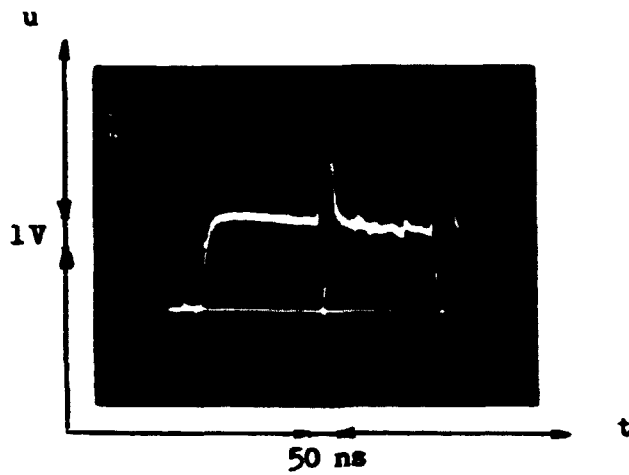
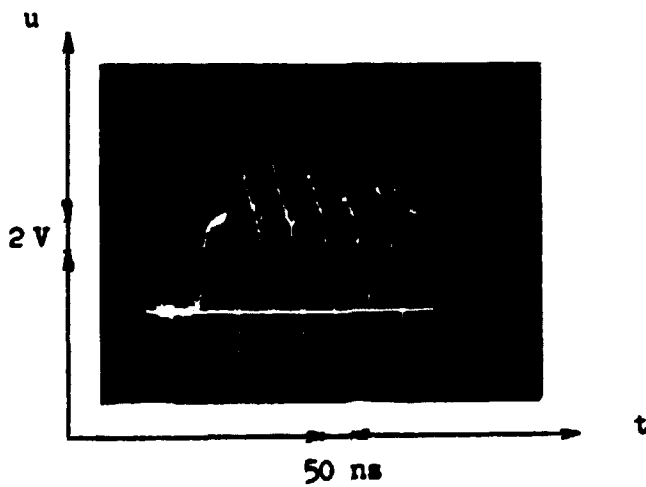


Figure n° 7 : Echelons de tension obtenus aux extrémités ouvertes des câbles de déclenchement après les fermetures du ME et du SME



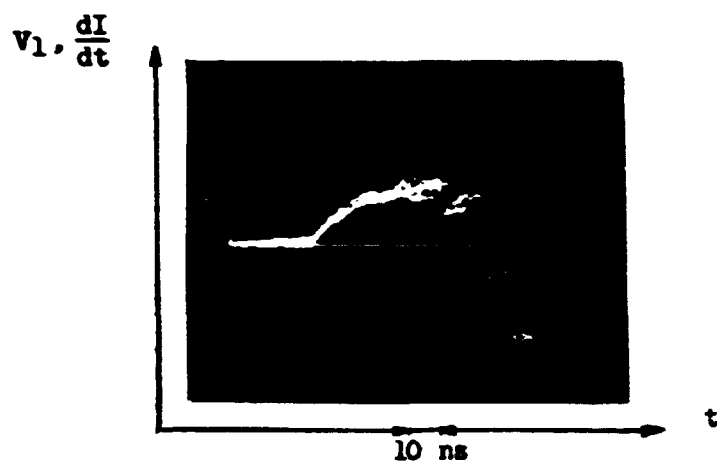
Le départ du SME apparaît sur le signal de la sonde au bout d'un temps égal à deux fois la longueur électrique séparant le SME de celle-ci.

Sonde placée entre le ME et le SME

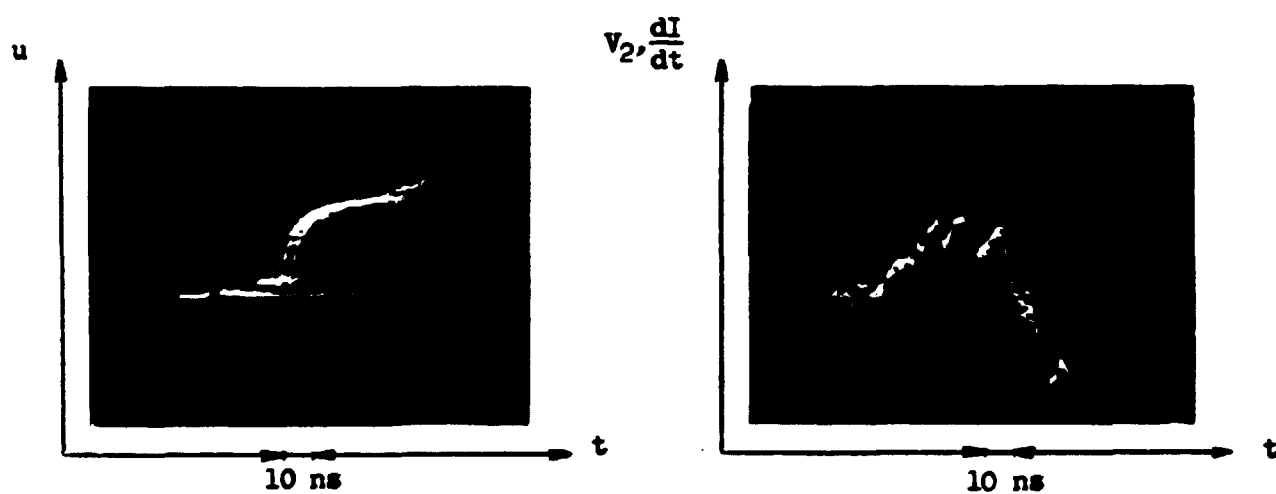


Sonde placée entre le SME et E

Figure n° 8 : Départs du SME et de E
vus par les sondes capacitives



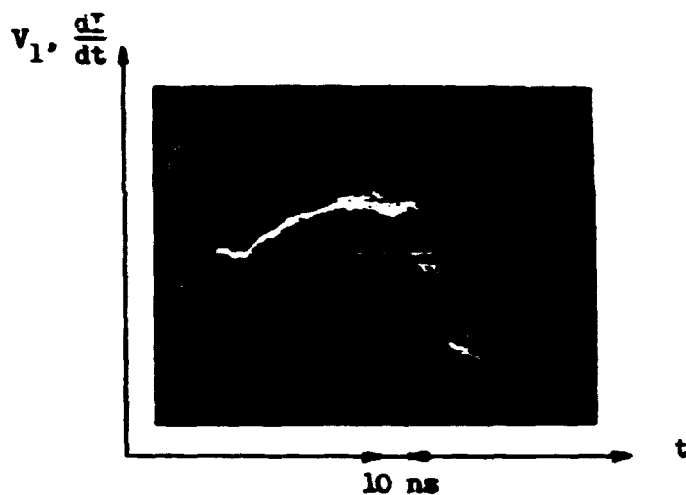
Jitter total



Jitter du SME
(Sonde capacitive)

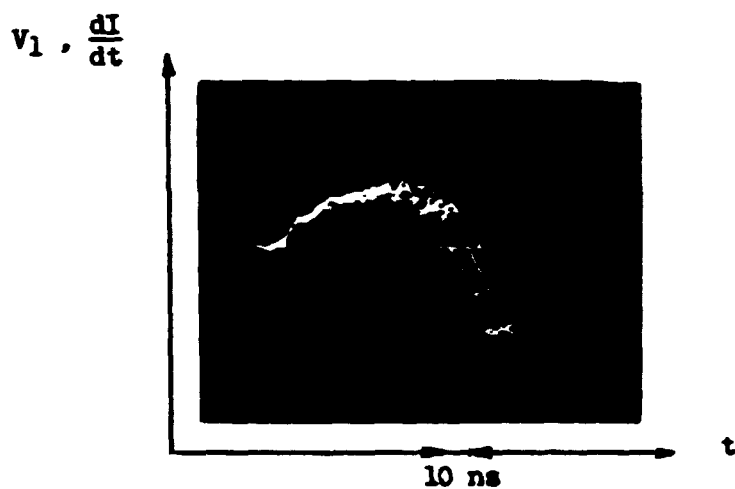
Jitter de E

Figure n° 9 : Jitters de la chaîne de déclenchement
ME - SME - E (90 kV)



Câble de 6 m entre ME et SME polarisé à $\frac{4V}{25}$

Câble de 20 m entre SME et E polarisé à $\frac{2V}{5}$



Câble de 20 m entre ME et SME polarisé à $\frac{4V}{25}$

Câble de 6 m entre SME et E polarisé à $\frac{2V}{25}$

Figure n° 10 : Influence sur le déclenchement
de la longueur des câbles

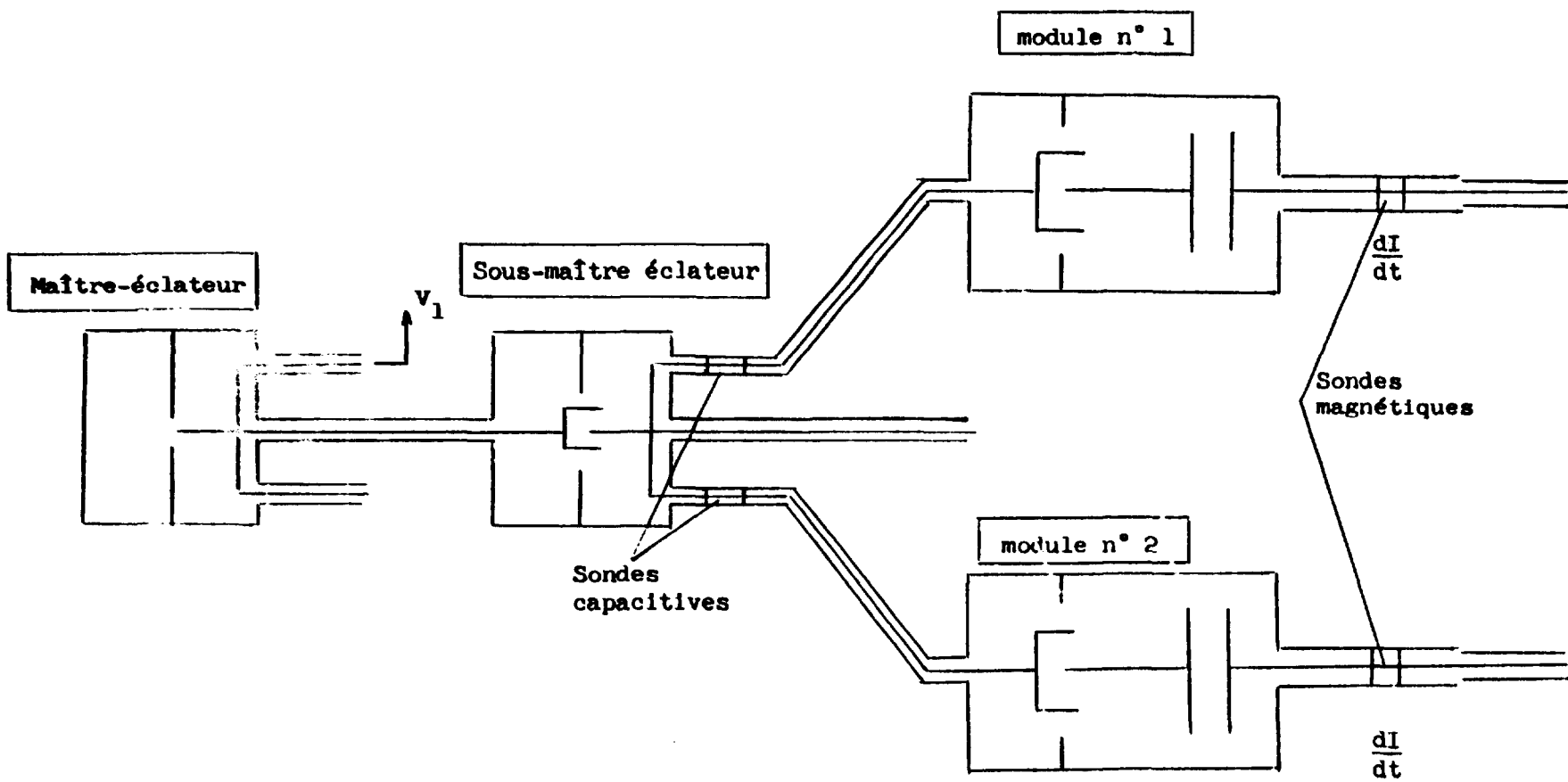
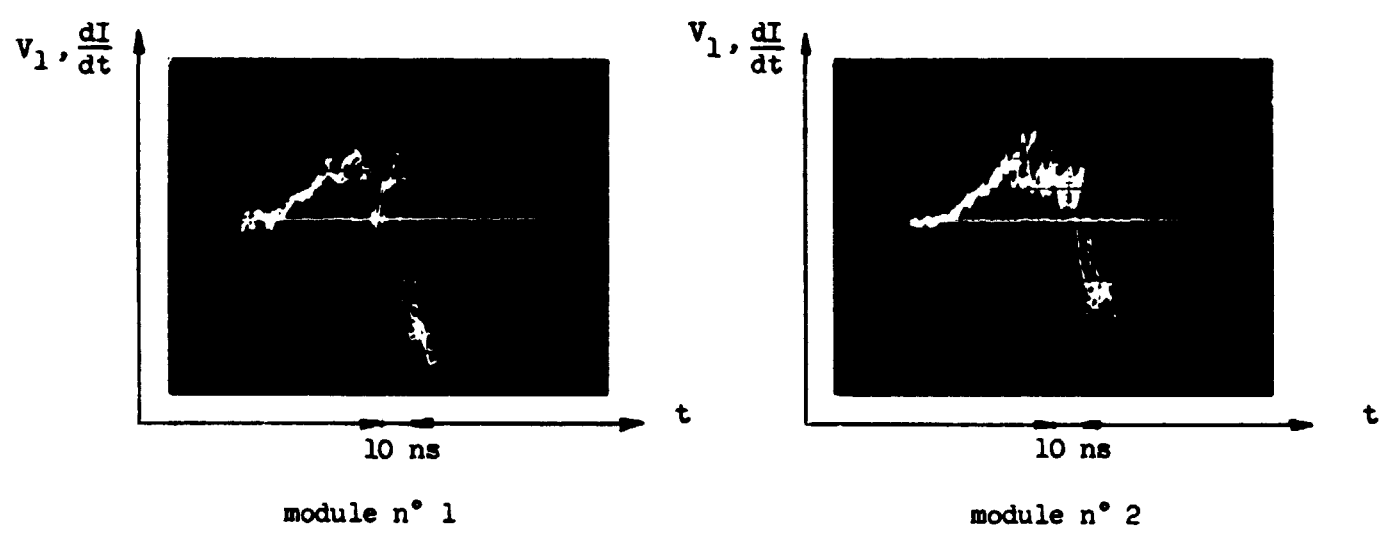
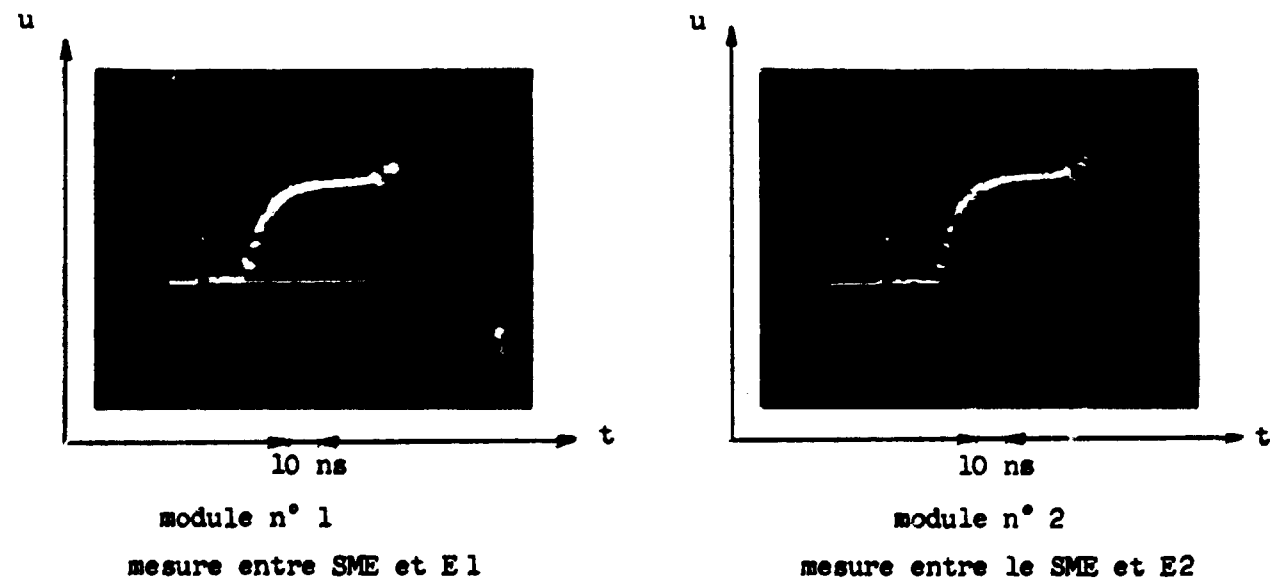


Figure n° 11 : Schéma de déclenchement de deux modules du banc



Jitters totaux



Jitter du SME

(le même jitter est mesuré deux fois)

Figure n° 12 : Déclenchement simultané
de deux modules du banc (90 kV)

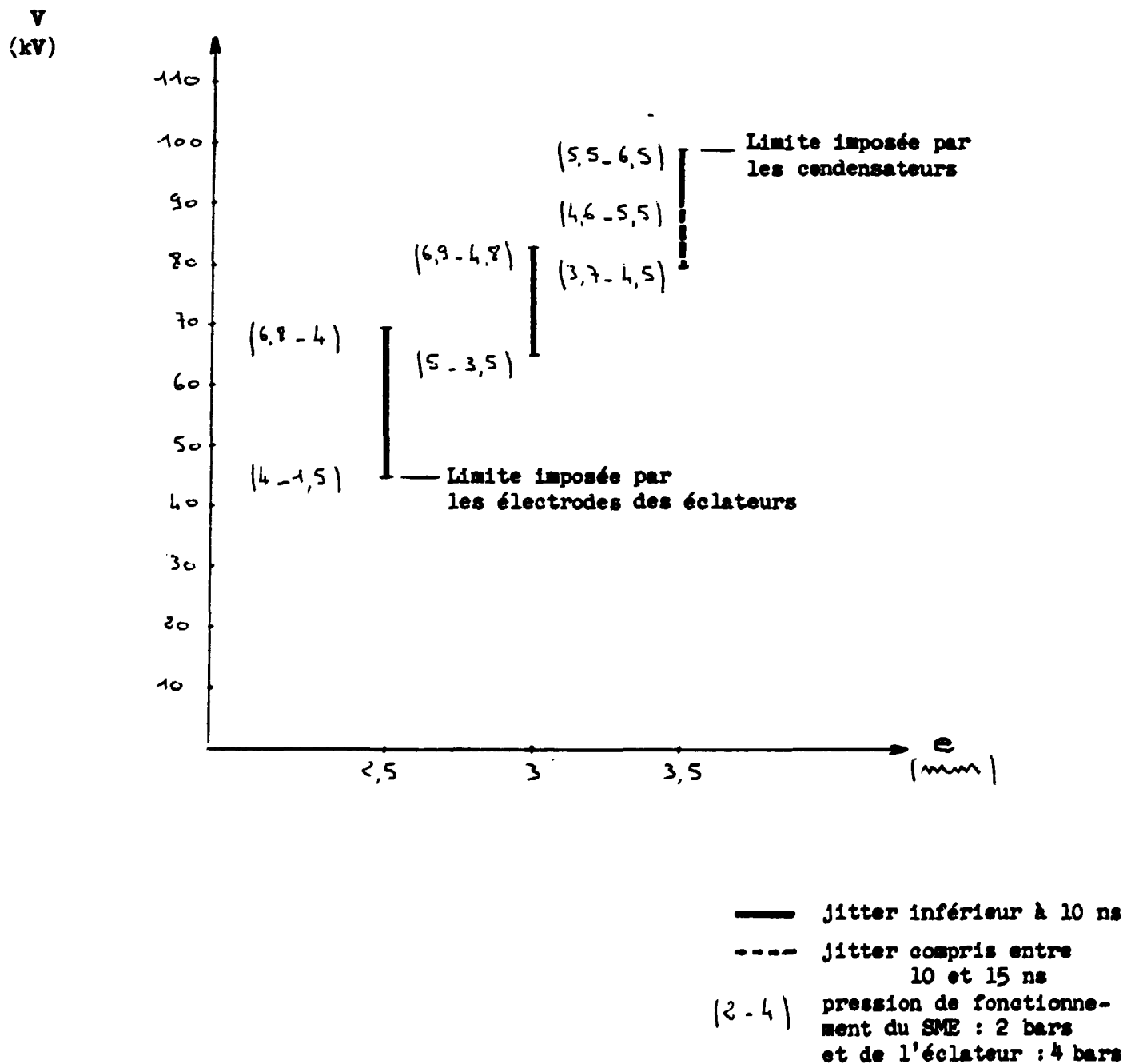
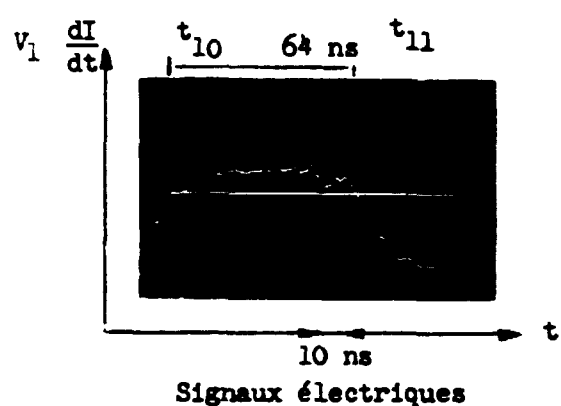
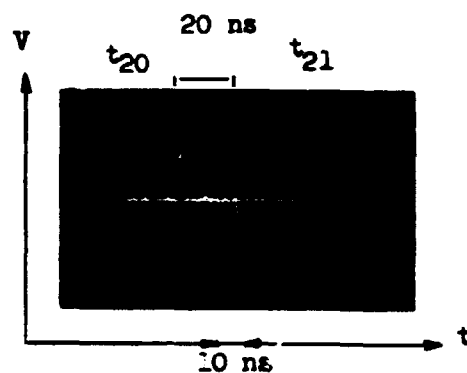
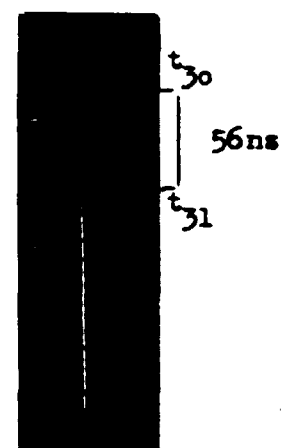
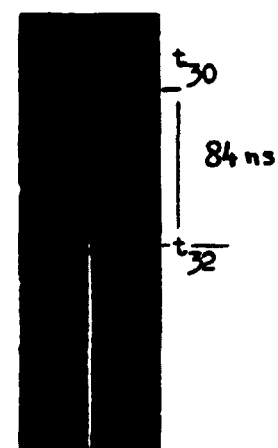
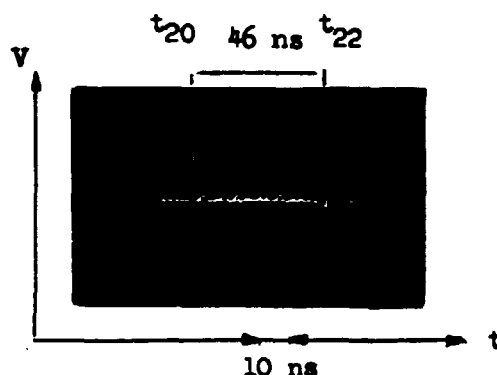
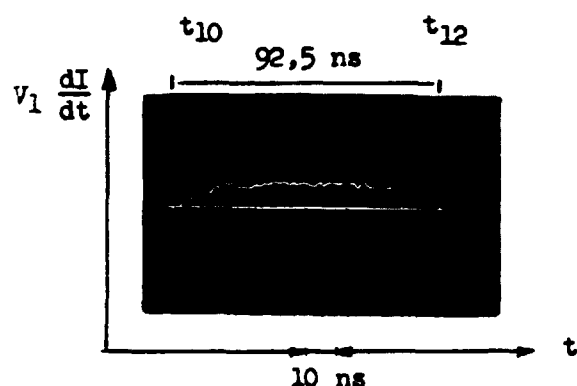


Figure n° 13 : Fonctionnement du SME :

tensions de charge des condensateurs en fonction
des écartements inter-électrodes totaux pour
un jitter global d'environ 10 ns



Signaux électriques

Fibre optique observée
avec un PMApparition du signal
de la fibre optique
sur la caméra(1) Fonctionnement normal de l'éclateur(2) Augmentation du retard au fonctionnement de l'éclateur
(pression d'utilisation plus grande)

$$(t_{12} - t_{10}) - (t_{11} - t_{10}) = \text{cste}$$

Nous voyons sur cette figure qu'une augmentation (ici volontaire) du retard de l'éclateur peut être suivie aussi bien avec les fibres optiques qu'avec les signaux électriques.

Les signaux fournis par les fibres optiques pouvant être observés soit avec des photomultiplicateurs, soit avec une caméra à balayage.

(Nous avons pour ces deux exemples, deux fibres optiques dans l'éclateur)

balayage
de réfé-
rence de la
caméra

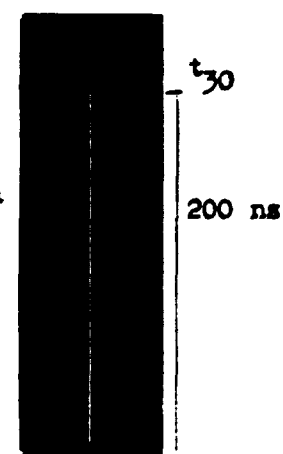


Figure n° 14 : Vérification du fonctionnement du banc
avec des fibres optiques

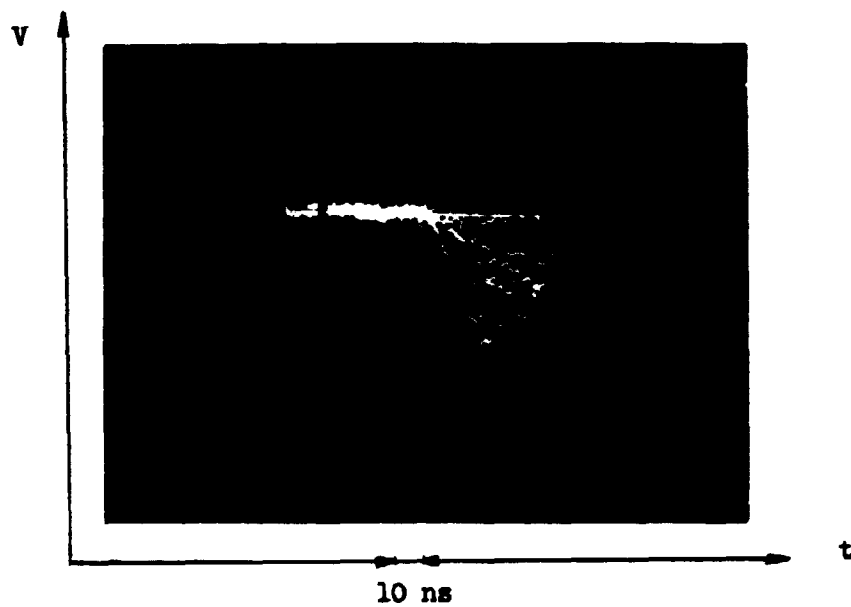
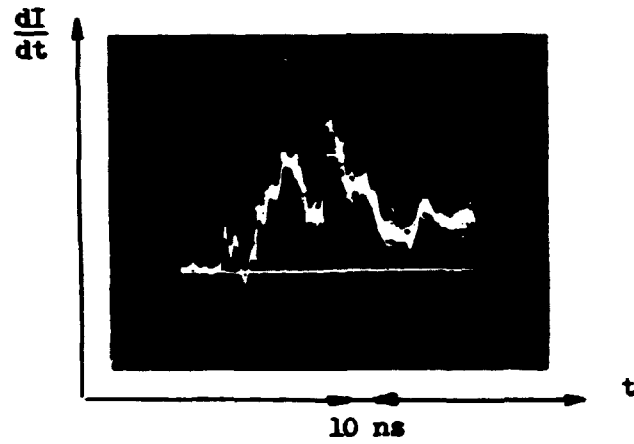
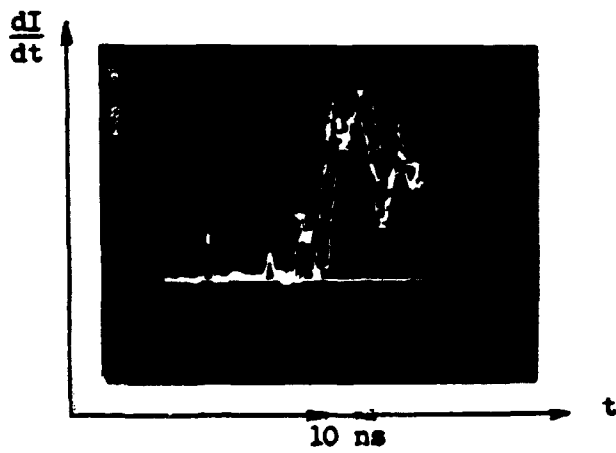


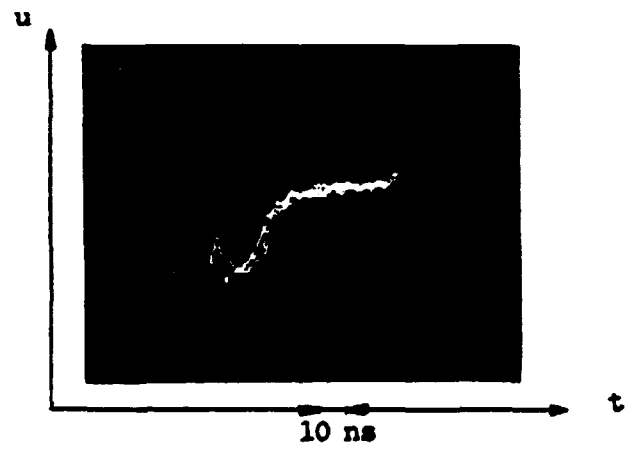
Figure n° 15 : Variation du flux lumineux
reçu par la fibre optique placée
dans l'éclateur.



Signaux sonde magnétique sur câbles HT



Jitter total à 80 kV



Jitter SME à 80 kV

Figure n° 16 : Jitters à la tension nominale de fonctionnement 80 kV

