

5/76

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

lex

المدرسة الوطنية للعلوم التطبيقية  
**PROJET DE FIN D'ETUDES**  
 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
 BIBLIOTHEQUE

MESURE DE LA VALEUR DE CRETE  
 A L'AIDE  
 القياس التفاضلي للقيمة العظمى للجهود التفاضلية  
 DU VOLTMETRE DE CHOC  
 المدرس  
 الأستاذ الدكتور  
 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
 BIBLIOTHEQUE

Proposé par:  
 M<sup>r</sup> Muharem DOBARDZIC  
 Docteur Ingénieur

Etudié par:  
 M<sup>r</sup> Abderrahmane BEROUAL

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

MESURE DE LA VALEUR DE CRETE  
A L'AIDE  
DU VOLTMETRE DE CHOC

Proposé par:

M<sup>r</sup> Muharem DOBARDZIC

Docteur Ingénieur

Etudié par:

M<sup>r</sup> Abderrahmane BEROUAL

PROMOTION 1976

A MES PARENTS

ET MES AMIS

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à  
Monsieur M. DOBARDZIC pour ses précieux conseils.

Je remercie également Mr. L. ZEBROWSKI et Mr. GAAL  
pour la traduction de documents en Allemand.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous les  
Professeurs qui ont contribué à ma formation.

INTRODUCTION

CHAP. 1 / CIRCUIT DE MESURE DE TENSIONS DE CHOCS

- 1.1 - Généralités.
- 1.2 - Equipement de mesure de tensions de Chocs.
- 1.3 - Diviseur de tension.
- 1.4 - Câble coaxial.
- 1.5 - Problèmes de mesures.

CHAP. 2 / METHODES DE MESURES DE LA VALEUR DE CRETE DE HAUTES TENSIONS RAPIDEMENT VARIABLES.

- 2.1 - Généralités.
- 2.2 - Mesure à l'aide de l'éclateur à sphères.
- 2.3 - Mesure à l'oscillographe cathodique.
- 2.4 - Mesure au voltmètre de crête.

CHAP. 3 / MISE EN SERVICE DU VOLTMETRE DE CHOC DE L'ENPA.

- 3.1 - Généralités.
- 3.2 - Principe de fonctionnement du voltmètre de choc de l'ENPA.
- 3.3 - Parties constitutionnelles et accessoires.
- 3.4 - Organes de commande et prises de raccordement.
- 3.5 - Caractéristiques techniques du voltmètre de choc de l'ENPA.
- 3.6 - Réglage et vérification de l'instrument.
- 3.7 - Mise en service.
- 3.8 - Vérification du fonctionnement.

CONCLUSIONS

LITTERATURE

- INTRODUCTION -

L'augmentation de la consommation d'énergie électrique et le besoin en alimentation constante et sûre imposent aux producteurs et constructeurs d'équipements électriques de prendre en considération toutes les contraintes pouvant surgir en cours d'exploitation.

Parmi les contraintes les plus dangereuses auxquelles est soumis l'équipement électrique haute tension sont les surtensions de foudre et de manoeuvre. Ces surtensions, de durées très brèves peuvent avoir une amplitude plusieurs fois plus grande que celle de la tension du réseau.

La forme de tension de foudre (l'onde de choc de foudre) est bien définie par les organismes de normalisation nationaux et international (C.B.I), alors que celle de manoeuvre ne l'est pas encore car ces surtensions varient dans une très grande échelle et elles dépendent de plusieurs facteurs.

Selon la Commission Electrotechnique Internationale (C.B.I), la forme de l'onde de choc de foudre est définie par une durée de front de  $1,2 \mu\text{s}$  et une durée de mi-amplitude de  $50 \mu\text{s}$ .

Les ondes de tensions de foudre sont de courtes durées (1 à  $100 \mu\text{s}$ ) alors que celles de manoeuvre sont plus longues (100 à  $5000 \mu\text{s}$ ).

La mesure de ces tensions dont la durée est très courte pose beaucoup de problèmes pour ce qui est du choix des circuits et dispositifs de mesures.

En laboratoire, la forme complète des ondes de tensions de foudre et de manoeuvre est enregistrée au moyen d'un oscillographe cathodique ; le phénomène est photographié et on peut suivre toute l'allure de la courbe tension-temps jusqu'à sa disparition.

A partir du photogramme, on peut relever la valeur quelconque, par exemple la valeur maximale de la tension (valeur de crête) ainsi que sa durée.

Bien

Malgré que la méthode oscillographique est la plus complète, le procédé de mesure de la valeur de crête est très long et la précision de lecture dépend beaucoup de l'opérateur.

La méthode classique de mesure de la valeur de crête est celle de l'éclateur à sphères. Cette méthode n'est pas très précise et les valeurs mesurées dépendent des conditions atmosphériques et de l'état de surfaces des sphères. Cependant elle est conservée jusqu'à l'heure actuelle à cause de la simplicité et la rapidité de mesure.

Actuellement, on utilise pour la mesure des valeurs de crête de tensions rapidement variables, les voltmètres de choc. L'avantage de ces appareils, est qu'ils permettent d'effectuer les mesures d'une manière rapide et avec une précision suffisante.

Dans le laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique, on a jusqu'à présent utilisé les méthodes oscillographique et d'éclateur à sphères. Ces deux dispositifs seront complétés par un voltmètre de crête qui n'a pas encore été mis en service.

Les problèmes liés à la mise en marche de ce voltmètre ainsi que les problèmes généraux de mesures des valeurs de crête de tensions de choc sont les questions auxquelles nous devons répondre dans la présente thèse.

Dans ce qui suit sera rappeler d'abord la théorie de mesure des tensions rapidement variables par les trois méthodes mentionnées et les détails liés au voltmètre de choc de l'ENP et son utilisation.

CIRCUIT DE MESURE DE TENSIONS DE CHOC.1.1 - GENERALITES

La forme d'onde des tensions de foudre, apparaissant au cours de décharges atmosphériques sur les lignes H.T. est, avec une approximation suffisante, celle d'une onde unidirectionnelle biexponentielle dont la durée de montée (Front) est de 1 à 10 us et la durée de descente (Queue) de 50 à 200 us.

D'après les normes nationales et les Recommandations de la Commission Electrotechnique Internationale (C.E.I), la forme d'une onde de foudre pleine pourra être représentée approximativement par une équation du type (1):

$$u = U_0 \cdot K ( e^{-\beta t} - e^{-\alpha t} )$$

où  $U_0$  désigne la valeur de crête;  $K, \alpha, \beta$  des coefficients réels positifs ( $\alpha > \beta$ ). Les valeurs proposées par la C.E.I pour ces coefficients sont pour une onde de 1,2/50  $\mu s$  :

$$\begin{aligned} K &= 1,0167. \\ \alpha &= 0,0162. \quad 10^6 \cdot s^{-1} \\ \beta &= 6,073. \quad 10^{-6} \cdot s^{-1} \end{aligned}$$

Cette forme est une forme théorique. En laboratoire on obtient les ondes avec les harmoniques parasites, superposées. Les caractéristiques de l'onde réelle seront donc difficilement décelables. Pour remédier à cet inconvénient, les normes donnent les caractéristiques conventionnelles pour définir une telle onde.

La définition d'une onde conventionnelle se base sur une forme permettant de définir l'origine et les durées du front et demi-amplitude (voir fig.11). Selon les normes, une onde est caractérisée par le rapport  $T1/T2$  (d'après la C.E.I ce rapport est égal à 1,2/50  $\mu s$ ).

La forme d'une onde de tension de foudre conventionnelle coupée, <sup>est</sup> représentée sur la figure 1.2

Les tensions de manoeuvre apparaissant lors d'un déclenchement sur les lignes, ont une forme plus variée, car la durée du front pourra être située (en fonction des paramètres des lignes et des appareils de coupure) entre 100 et 500  $\mu$ s, et celle de queue entre 1000 et 5000  $\mu$ s. C'est pour cette raison que la forme des tensions de manoeuvre n'est pas encore normalisée pour les essais.

Les durées de tensions de foudre sont donc beaucoup plus courtes que celles de manoeuvre. On peut donc parler de tensions de choc de courte durée (de foudre) et de longue durée (de manoeuvre). La mesure de ces tensions, en tout cas rapidement variables nécessite un équipement bien approprié que nous allons étudier dans ce qui va suivre.

## 1.2. - Équipement de mesure de tension de choc

Le dispositif de mesure de tension de choc a pour but de reproduire fidèlement la tension de choc fournie par le générateur de choc à l'objet d'essai et de donner la valeur de l'amplitude maximale ainsi que celle de la durée de l'injection de la tension.

Dans notre étude nous nous intéresserons particulièrement à la valeur de l'amplitude maximal des hautes (HT) et très hautes tensions (THT). Comme cette valeur est très élevée, l'appareillage de mesure ne peut être connectée directement en parallèle sur l'objet d'essai. Il doit être **raccordé au secondaire** d'un diviseur de tension au moyen d'un câble coaxial (à distance) permettant ainsi d'obtenir un circuit basse tension dont les paramètres sont accessibles.

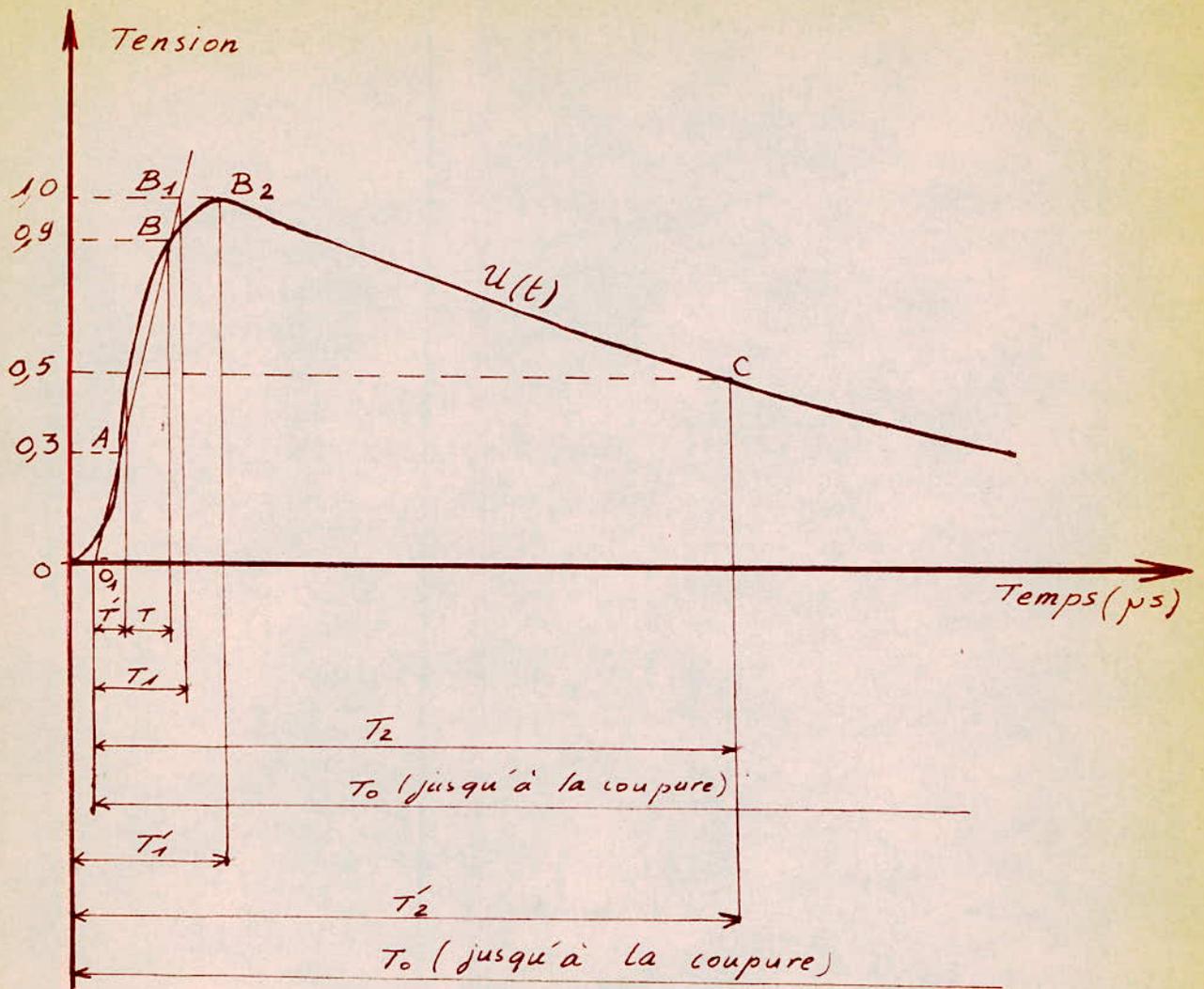


Fig. 1. 1.

FORME D'ONDE DE TENSION DE CHOC PLEINE NORMALISEE.

$$T_1 = 1,67 \cdot T \quad ; \quad T' = 0,3 \cdot T_1 = 0,5 \cdot T \quad ; \quad s = (u_B - u_A) \cdot / T$$

$T'_1$  et  $T_1$  : durée réelle et durée conventionnelle du front ;  
 $T'_2$  et  $T_2$  : durée réelle et durée conventionnelle jusqu'à la coupure ;  
 $T'_0$  et  $T_0$  : durée réelle et durée conventionnelle de la tension de choc ;  
 $O$  et  $O_1$  : origine réelle et origine conventionnelle de la tension de choc ;  
 $OB$  et  $O_1B_1$  : front réel et front conventionnel ;  
 $s$  : raideur conventionnelle .

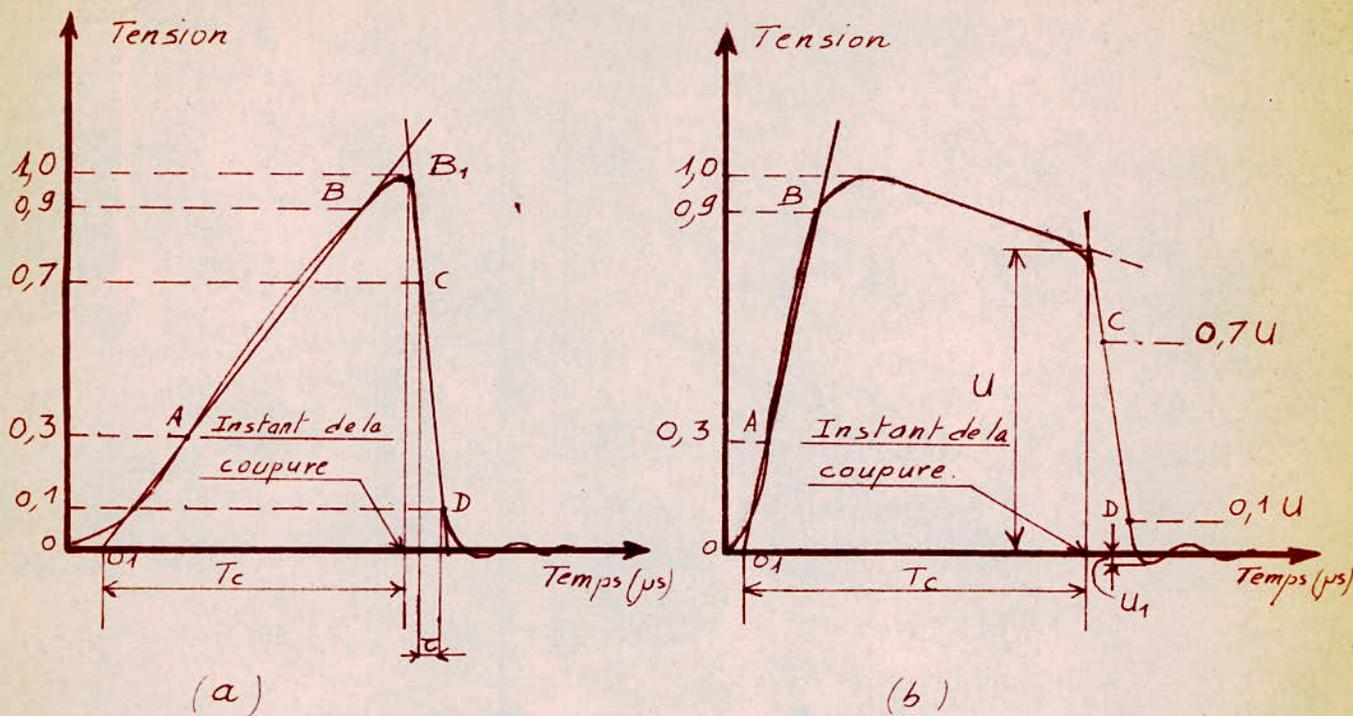


Fig. 1.2.

### Tensions de choc coupées normalisées:

- a) Tension de choc coupée sur le front.  
 $T_{fc}$ : Durée conventionnelle de la chute de tension pendant la coupure;  
 $T_c$ : Durée conventionnelle jusqu'à la coupure;  
 $C$ : Moment conventionnel de la coupure.
- b) Tension de choc coupée sur la queue.  
 $U$ : Valeur estimée de la tension à l'instant de la coupure;  
 $C$ : Moment conventionnel de la coupure.

La figure 1.3 donne une représentation générale d'un circuit de mesure.

L'équipement de mesure des tensions de choc doit donc comprendre essentiellement :

- Un diviseur de tension ;
- Un câble coaxial ;
- Des appareils d'enregistrement et de mesures de la tension.

L'appareillage d'enregistrement et de mesure sera abordé dans un chapitre ultérieur où nous traiterons des méthodes de mesures.

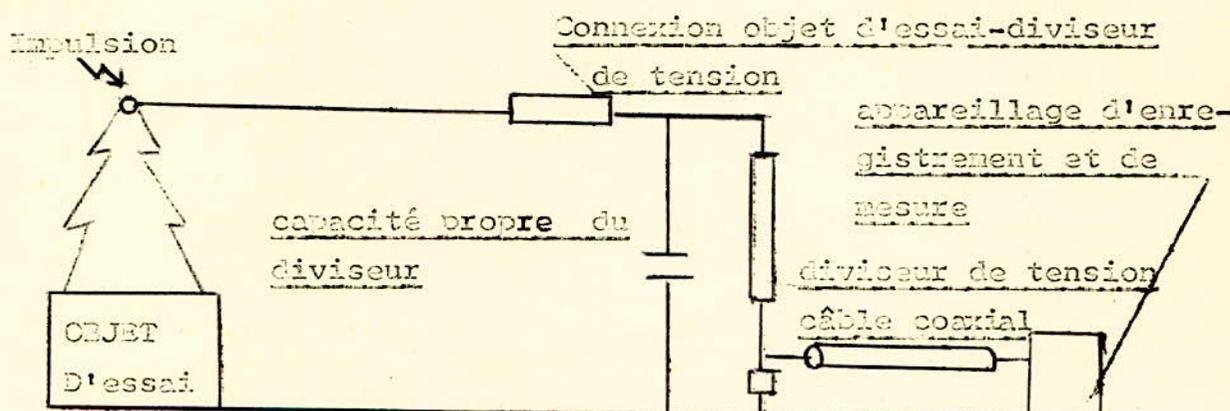


Fig. 1.3.

SCHEMA DE PRINCIPE DU CIRCUIT DE MESURE

1.3. - DIVISEUR DE TENSION

Il existe plusieurs types de diviseurs de tension dont les plus fréquemment utilisés sont :

- Le diviseur résistant simple.
- Le diviseur mixte : résistant capacitif.
- Le diviseur capacitif.
- Le diviseur à écran de repartition du champ.

Dans ces diviseurs, le schéma de principe est le même seuls les composants électriques sont différents. Ils sont constitués essentiellement de deux impédances en série  $Z$  et  $z$  (fig.1.4) où  $Z$  est l'élément haute tension et  $z$  celle de la basse tension du diviseur (bras HT et bras BT).

Le câble coaxial reliant le diviseur avec le voltmètre de choc est branché aux bornes BT. La tension de choc issue du générateur de choc est appliquée en A; les deux bornes B et D sont reliées à la terre.

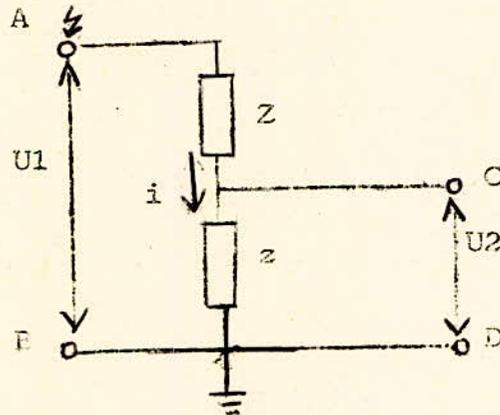


Fig. 1.4.

SCHEMA DE PRINCIPE DU DIVISEUR DE TENSION

En supposant que les courants traversant les appareils de mesures et d'enregistrement sont négligeables, on pourra écrire :

$$\begin{aligned} U_1 &= (Z + z) \cdot i \\ \text{et} \\ U_2 &= z \cdot i \end{aligned}$$

d'où

$$U_2 = \frac{z}{Z + z} \cdot U_1 = K_r \cdot U_1 \quad \text{avec} \quad K_r = \frac{z}{Z + z}$$

Pour les HT et THT  $z$  est très faible par rapport à  $Z$ , ce qui nous permet de simplifier la formule précédente :

$$K_r = \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{z}{Z}$$

La valeur de  $z$  est celle du bras BT et du câble de raccordement.

Aux différents éléments (capacités, résistances) composants les impédances  $Z$  et  $z$  correspond un type de diviseur. Si  $Z$  et  $z$  sont des résistances pures  $R$  et  $r$ , le diviseur est appelé diviseur résistant simple. Son rapport de réduction en régime stationnaire est :

$$K_r = \frac{U_2}{U_1} = \frac{r}{R + r}$$

En régime transitoire, l'existence de capacités parasites entre la colonne résistante de l'élément H.T. et le sol rend discutable la validité du rapport de réduction  $K_r$  (fig.1.5). En effet, l'expression de  $K_r$  ( $K_r = \frac{r}{R + r}$ ) n'est plus valable du fait que les capacités au sol mettent un certain temps pour se décharger après l'application de la tension de choc.

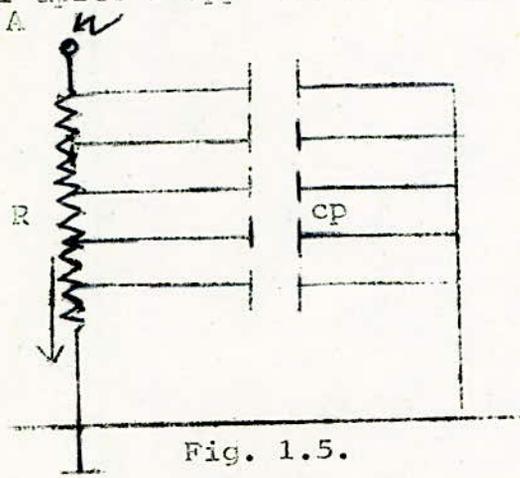


Fig. 1.5.

Schema du diviseur Ohmique avec capacité parasites  $C_p$  au Sol.

Les capacités parasites sont une des causes des distorsions des signaux transmis.

Pour réduire ces capacités parasites transversales c. a. d. pour obtenir une répartition de la tension linéaire on a connecté des capacités longitudinales (construction de K.BERGER) en plusieurs points de la colonne résistante, afin que la répartition capacitive soit, dès les premiers instants de choc, égale à la répartition résistive.(2)

Ceci suppose que toutes les constantes de temps (RC) des éléments de la colonne ont la même valeur et que les capacités longitudinales introduites sont importantes devant les capacités parasites. Le diviseur ainsi conçu est appelé diviseur mixte (résistif - capacitif), son schéma est représenté sur la fig.1.6.

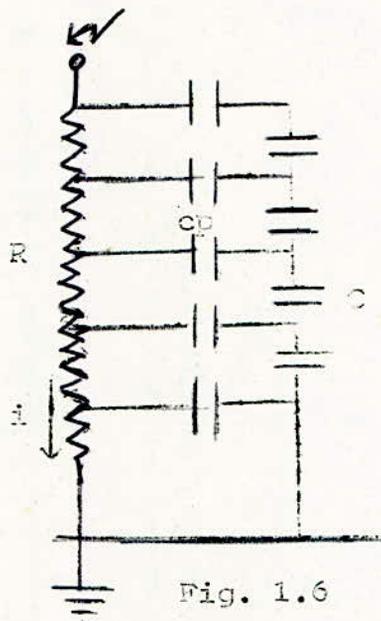


Fig. 1.6

Schéma d'un diviseur Mixte (résistif - capacitif)

Pour avoir une décroissance progressive du potentiel en fonction de la hauteur de la colonne, les capacités élémentaires dans ce schéma doivent être en nombre suffisant.

Soient  $C_t$  la capacité longitudinale résultante et  $C_{pt}$  la capacité totale parasite, Ceci étant, on peut démontrer que la variation du potentiel, en fonction de la hauteur, suit une loi d'autant plus linéaire que le rapport  $V/C_t$  est petit ; ce qui exige un choix de capacités série importantes pour l'efficacité du circuit. :

En effet, si  $X$  est la hauteur de la colonne, les potentiels à une hauteur  $x$  ( $x < X$ ) et la hauteur  $X$  sont respectivement, d'après les équations d'une ligne (3) :

$$\begin{aligned}
 V_x &= V_1 \cosh nx + m_1 \sin h nx && \text{avec} \\
 & && \left( n = \sqrt{\frac{CD}{C}} = \sqrt{\frac{C_{pt}}{C_t}} \right) \\
 V_X &= V_1 \cosh nX + m_1 \sin h nX
 \end{aligned}$$

D'autre part, d'après le schéma de la figure 1.6, le système est court-circuité à la base, donc  $V_1 = 0$ . Le système d'équations deviendra alors :

et 
$$V_x = m_{i1} \sin h \quad n_x$$

d'où 
$$V_X = m_{i1} \sin h \quad n_X$$

$$V_x = V_X \frac{\sin h \quad n_x}{\sin h \quad n_X}$$

si  $n \frac{z}{C_t} = \frac{C_{pt}}{C_t}$  est petit on aura :

$$\begin{aligned} \sin h \quad n_x &\sim n_x \\ \sin h \quad n_X &\sim n_X \end{aligned}$$

d'où :

$$V_x = V_X \cdot \frac{x}{X}$$

Comme  $V_t$  et  $X$  sont connues, en posant  $\frac{V_t}{X} = a$ , on pourra écrire

$$V_x = a \cdot x. \quad \text{d'où la loi énoncée au paravant.}$$

Remarquons en passant, que l'une des utilisations de cette loi est la mesure de repartition des tensions le long de l'enroulement (H.T. ou B.T) d'un transformateur.

Le choix des capacités série aussi importantes entraînerait une faible inductance en choc, <sup>(2)</sup> lors de la mesure d'impulsion très brèves. De plus, un autre facteur est à prendre en considération et qui est celui de la capacité équivalente du diviseur, d'après le montage, la capacité équivalente du diviseur placée en parallèle avec le circuit principal, s'ajoute à celle servant pour la formation du front de l'onde de tension, influant ainsi sur la forme de cette dernière. D'autre part, la capacité équivalente du diviseur de tension doit être prise en considération lors des mesures de tensions de choc étant donné qu'elle est partie constituante du générateur.

Le diviseur mixte ne pourra donc être utilisé sans que l'on puisse tenir compte de sa capacité et de son influence sur la forme d'onde.

Les distorsions introduites par la colonne résistante peuvent être réduites par une répartition électrostatique des potentiels le long du diviseur correspondant à la répartition résistante. Ces deux systèmes obéissent à la même loi de variation des potentiels.

De l'hypothèse d'identité des deux systèmes de potentiel, nous pouvons considérer que la colonne résistante ne porte pas de charges et que le courant aura rigoureusement la même valeur  $\frac{UI}{R}$  tout le long de la colonne, représentant fidèlement le signal appliqué à son sommet.

On peut exprimer la condition d'inexistence du régime transitoire par la relation :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = K. r (x)$$

où V représente le potentiel électrostatique en absence de la colonne et r la résistance linéique au point de hauteur x. On remarque d'après cette équation que le champ électrostatique longitudinal est une fonction linéaire de r et ce, à tout instant.

Pour obtenir cela, on fixe aux deux extrémités de la colonne des écrans conducteurs qu'on ajuste soigneusement afin d'obtenir une répartition de champ homogène ; l'écran inférieur est le plus souvent constitué par le sol lui même.

Il suffit de régler la résistance pour qu'elle suive la même loi de variation que le potentiel sur l'axe du système puisque c'est sur cet axe que viendra prendre place la colonne résistante. On pourra ainsi obtenir une variation de potentiel linéaire.

Une réalisation convenable du système colonne écrans permettra de rendre négligeable son temps de réponse étant donné qu'il est seulement défini par l'inductance propre du bobinage. (2) Le diviseur ainsi constitué est appelé diviseur de tension à écrans de repartition (fig.1.7).

On peut aussi rencontrer des diviseurs de tensions dont les impédances  $Z$  et  $z$  sont constituées uniquement de capacités, d'où leurs noms de diviseurs capacitifs (fig.1.8). Nous en donnons un bref aperçu à titre indicatif, vu qu'ils sont peu utilisés en technique de mesures de tensions rapidement variables.

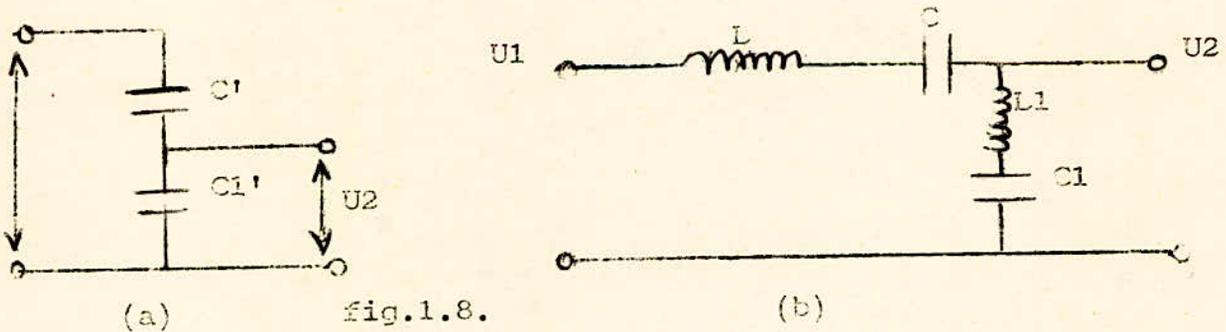


Schéma de principe d'un diviseur capacitif  
 a) avec capacités.  
 b) avec capacités et inductances parasites.

En tenant compte des inductances de connexions et des inductances internes, le rapport de réduction aura pour valeur :

$$K_c = \frac{c}{C_1 + c} \quad \text{si } C \ll C_1 \Rightarrow K_c \neq \frac{C}{C_1}$$

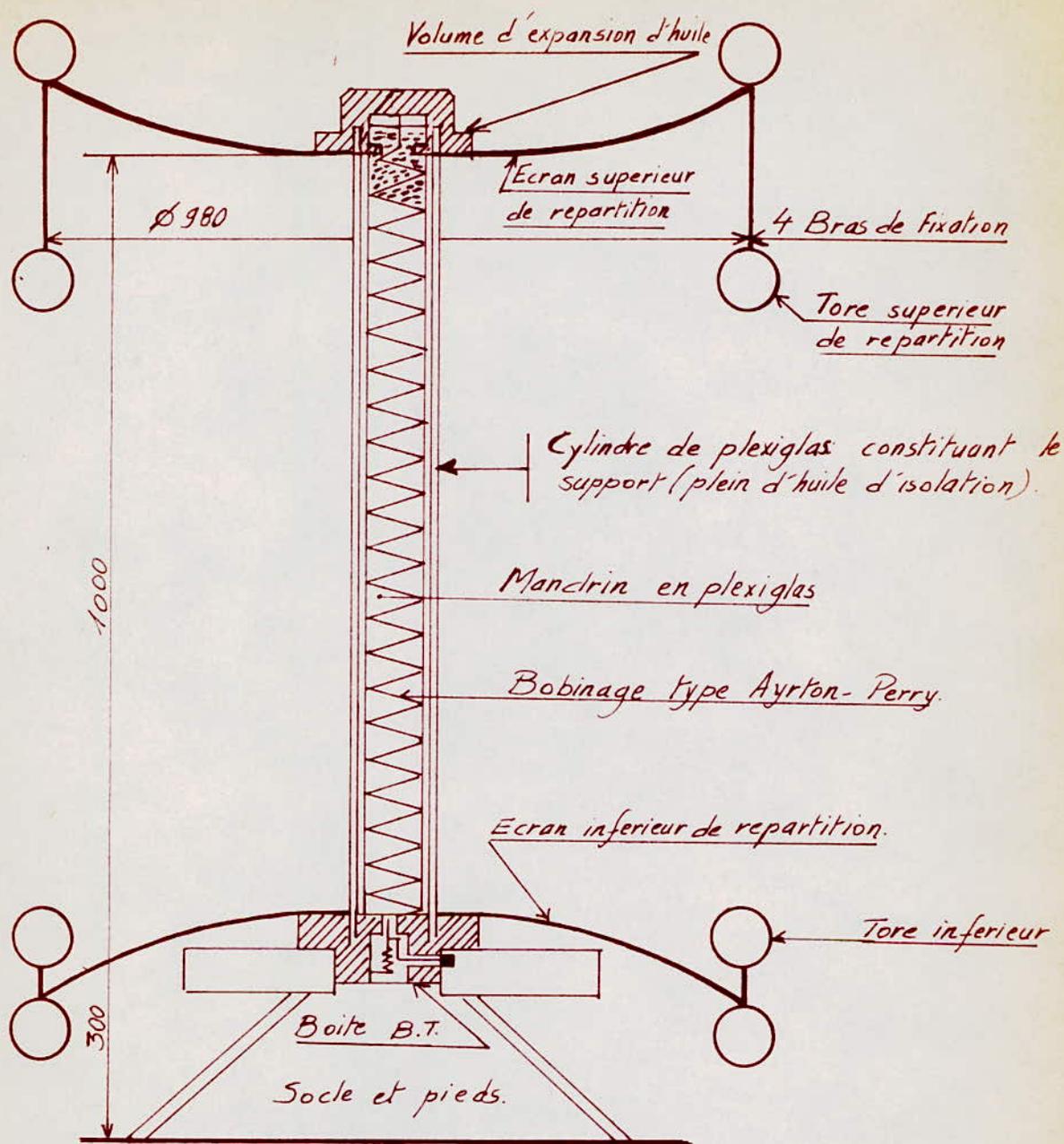


Fig. 1.7.

Coupe schématique longitudinale d'un diviseur ohmique.  
(d'après C. GARY.)

Au circuit du secondaire du diviseur de tension sont branchés en parallèle les appareils de mesures ou d'enregistrement, on doit donc tenir compte de leurs impédances dans le rapport de réduction du diviseur de tension.

1.4. - CABLE COAXIAL

Le câble coaxial a pour fonction d'assurer la transmission des signaux recueillis au secondaire du diviseur de tension, aux appareils d'enregistrement et de mesures.

Ce câble doit répondre à certaines exigences dont la plus importante est son adaptation aux dispositifs de mesures dans le but d'avoir une bonne transmission.

- Réflexion et adaptation du câble Coaxial

Une source de tension émettant des signaux à l'une des extrémités d'un câble coaxial, donne naissance à des ondes qui s'y propagent jusqu'à ce qu'elles rencontrent une discontinuité (transition) où elles sont réfléchies. Cette réflexion peut, selon les caractéristiques de la charge, être partielle ou totale.

Dans le cas où l'onde injectée atteint le point de transition, on dit qu'on a une onde incidente. On appelle aussi onde transmise la partie de l'onde qui continue à circuler en aval du point de transition et onde réfléchie celle qui rebrousse chemin après réflexion sur le point de transition.

L'analyse mathématique montre que le câble de transmission de l'onde  $u(t)$  peut être assimilée à un générateur d'impédance interne  $Z_0$  et de f.e.m à vide  $2 u(t)$ . Le schéma équivalent du câble est représenté dans la figure 1.9. (2) et (4)

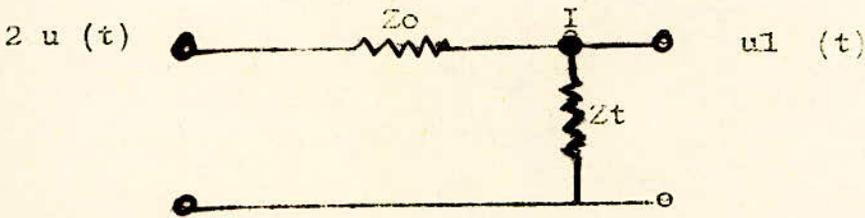


Fig.1.9

Schéma équivalent à l'extrémité d'une ligne

$Z_0$  : impédance caractéristique du câble.

$Z_t$  : impédance terminale.

On montre que le rapport de l'onde transmise ( $u_1$ ) à l'onde incidente ( $u$ ) définit le taux de transmission  $K_t$ ; il est égal à :

$$K_t = \frac{2 Z_t}{Z_0 + Z_t}$$

On peut aussi définir le taux de réflexion  $K_r$  par le rapport de l'onde réfléchie à l'onde incidente :

$$K_r = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0}$$

On voit d'après ces expressions que  $K_r$  est fonction de l'impédance terminale  $Z_t$ ; c'est en général un nombre complexe qu'on pourra mettre sous la forme :

$$K_r = A. e^{j\varphi}$$

Où  $A$  et  $\varphi$  sont respectivement l'amplitude et la phase de l'onde réfléchie par rapport à l'onde incidente. On peut selon la position et la valeur de l'impédance  $Z_t$  distinguer divers cas.

1°) L'extrémité de la ligne est court - circuitée,  
 $Z_t$  est nulle.

$$K_t = 0 \text{ et } K_r = 1 \Rightarrow A = 1 \text{ et } \psi = +\pi$$

Ces relations traduisent une réflexion totale avec inversion de polarité. L'onde transmise au point de discontinuité est nulle étant donnée qu'elle est la somme des tensions incidente et réfléchie. L'énergie fournie par le générateur est totalement réfléchie.

2°) L'extrémité de la ligne est ouverte,  $Z_t = \infty$  :

$$K_t = 2 \text{ et } K_r = +1 \Rightarrow A = 1 \text{ et } \psi = 0$$

Ce qui signifie que la réflexion de l'onde est totale ; l'onde réfléchie et l'onde incidente sont en phase et l'énergie est entièrement réfléchie. La tension  $u$  à l'extrémité de la ligne est égale au double de la tension incidente, mais le courant  $y$  est nul.

3°) L'extrémité de la ligne est fermée sur  $Z_t$  différente de  $Z_0$  :

Dans ce cas les coefficients  $K_t$  et  $K_r$  sont fonction de  $(Z_t, Z_0)$  et on aura réflexion et transmission partielles de l'onde incidente ; seule une partie de l'énergie fournie par le générateur est absorbée par l'impédance  $Z_t$ .

4°) L'extrémité de la ligne est fermée sur une impédance égale à l'impédance d'onde,  $Z_t = Z_0$  :

$$K_t = 1 \text{ et } K_r = 0.$$

Il n'y a aucune réflexion mais transmission totale de l'onde incidente. L'absorption par  $Z_t$  de l'énergie fournie est totale. C'est le cas le plus important étant donné que le câble se comporte comme un organe retardateur qui transmet le signal jusqu'aux bornes de  $Z_t$ .

On dit que le câble est adapté sur son impédance caractéristique. Cette condition doit être réalisée pour que le fonctionnement du dispositif soit correct. L'impédance terminale ainsi que l'impédance du câble coaxial doivent être prises en considération pour le calcul du facteur de réduction du diviseur de tension.

Les résultats précédents ne sont valables que pour les systèmes où les lignes de champs électrique et magnétique forment un réseau orthogonal. Ce qui est le cas des câbles utilisés en mesure d'impulsions H.T.

### 1.5. - PROBLEMES DE MESURES

La nécessité d'utiliser des câbles de raccordements et des diviseurs de tensions s'affronte aux problèmes de propagation (surtout pour les chocs de foudre) et de réception des informations. Ces dispositifs ne sont donc parfaits et introduisent des erreurs en déformant souvent de façon non négligeable les signaux qu'ils ont à transmettre, les connexions, la qualité du câble et les champs externes en sont les principales sources d'erreurs.

La connexion reliant le diviseur à l'objet, le diviseur lui-même, et tout le système d'enregistrement basse tension est à l'origine des pertes d'information souvent importantes, allant jusqu'à déformer parfois complètement les formes d'ondes et qui sans prédispositions conduisent à des interprétations fausses.

L'atténuation peut être due à plusieurs facteurs, dont les plus importants sont l'effet de peau dans l'âme du câble (aux fréquences croissantes), les pertes par effet joule dans les conducteurs et les pertes diélectriques dans l'isolant.

Pour palier à ces problèmes, on utilise des dispositifs peu influençables par les paramètres parasites et les champs externes.

- CHAPITRE -II-

METHODES DE MESURES DE LA VALEUR DE CRETE  
DE TENSIONS RAPIDEMENT VARIABLES

---

2.1 - GENERALITES

Les mesures de tensions de très courtes durées et d'amplitudes très élevées telles que celles de foudre et de manoeuvre font appel à des méthodes utilisant des dispositifs spéciaux dont l'éclateur à sphères, l'oscillographe cathodique et le voltmètre de crête.

La mesure de la valeur de crête au moyen de l'éclateur à sphères est une méthode classique. Elle consiste à déterminer directement la tension d'amorçage entre deux électrodes dont le diélectrique est le plus souvent l'air. La valeur mesurée dépend surtout de la distribution du champ entre les électrodes, définie par les dimensions des électrodes et leur distance. Elle dépend aussi des conditions d'ambiance telles que la pression, la température et l'humidité de l'air.

La mesure de la valeur de crête de H.T. par les méthodes oscillographique et voltétrique s'effectuent indirectement, par l'intermédiaire des diviseurs de tension. Ces deux méthodes, du point de vue de la précision, ont certains avantages par rapport à l'éclateur à sphères. Cependant, pour des raisons de simplicité et de rapidité de mesures, on utilise couramment l'éclateur à sphères.

Nous nous proposons dans ce qui va suivre d'analyser plus en détails ces méthodes et les dispositifs de mesures.

2.2. - MESURE A L'AIDE DE L'ECLATEUR A SPHERES

Dans le cas le plus courant, un éclateur à sphères est constitué de deux sphères métalliques de même rayon R, situées à une distance a l'une de l'autre et dont l'axe commun peut être soit parallèle, soit perpendiculaire au plan terre (fig.2.1 et 2.2), la position verticale étant la plus fréquente pour des raisons d'encombrement.

Le laquage entre les sphères se produit à l'endroit où l'intensité du champ est maximum. Le champ électrique maximum est dans l'axe des deux sphères. Il dépend de la tension et de la distance entre les sphères • Il se calcule d'après la formule suivante :

$$E_{max} = \beta \cdot \frac{U_{max}}{a}$$

Le coefficient  $\beta$  est fonction du rapport  $\frac{a}{R}$  et de la disposition de l'éclateur qui peut être à deux sphères isolées ou à une sphère isolée et l'autre mise à la terre (fig.2.3). Le tableau T.2-1 donne les valeurs de  $\beta$  en fonction du rapport  $\frac{a}{R}$  et la disposition de l'éclateur par rapport à la terre. (5)

T. 2 - 1.

$\frac{a}{R}$	Cas de deux sphères isolées $\beta_s$	Cas d'une sphère isolée et l'autre mise à la terre $\beta_0$
C	1	1
0, 1	1, 034	1, 034
0, 2	1, 068	1, 068
0, 3	1, 102	1, 106
0, 5	1, 173	1, 199
1, 0	1, 359	1, 517
5, 0	3, 151	5, 172
10, 0	5, 151	-
100, 0	50, 51	-
1000, 0	500	-

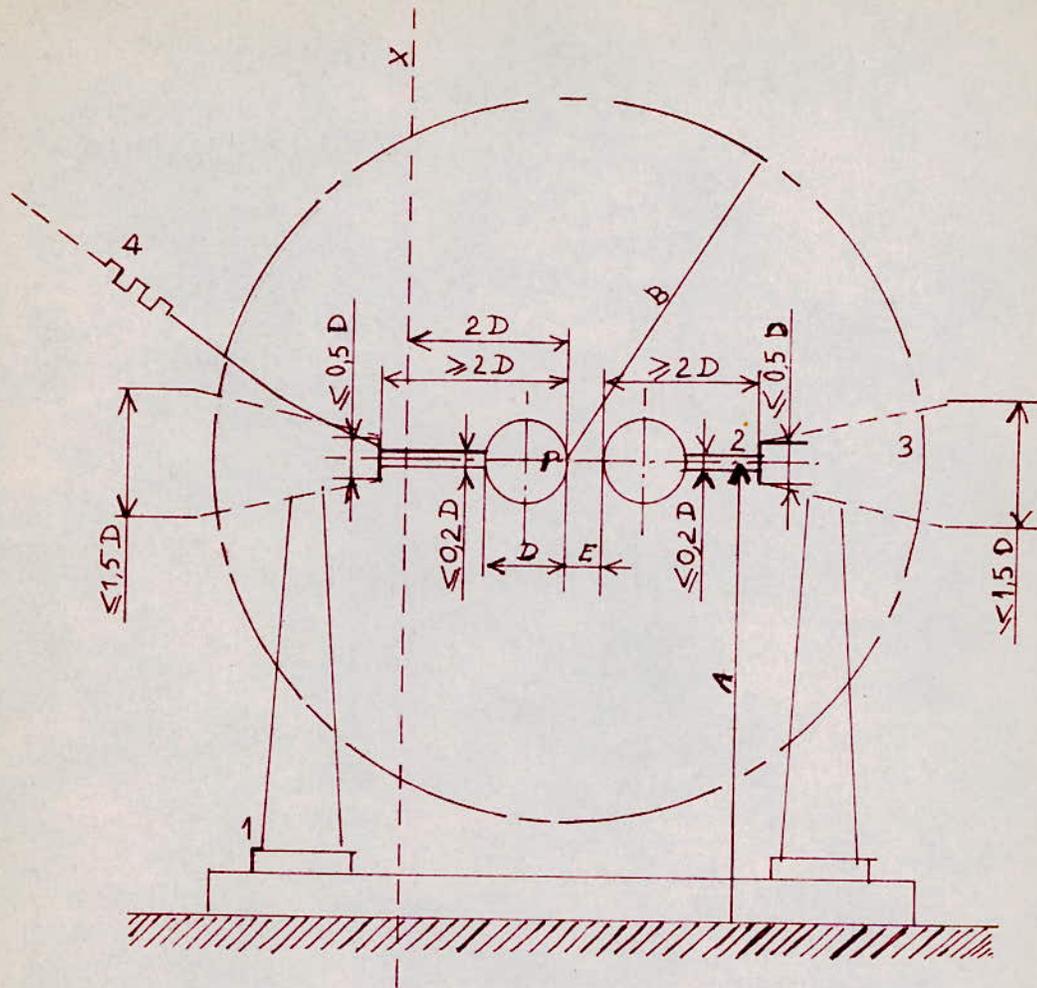


Fig. 2.1.  
Eclateur à axe parallèle au plan de terre.  
(recommandations CEI).

1. Support isolant
2. Tige support de la sphère
3. Mécanisme de manœuvre
4. Connexion à haute tension avec résistance en série
- A. Distance de P au plan de terre
- B. Distance de P à tout objet étranger
- P. Point d'étincelle de la sphère sous tension
- X. Plan normal à l'axe de l'éclateur.

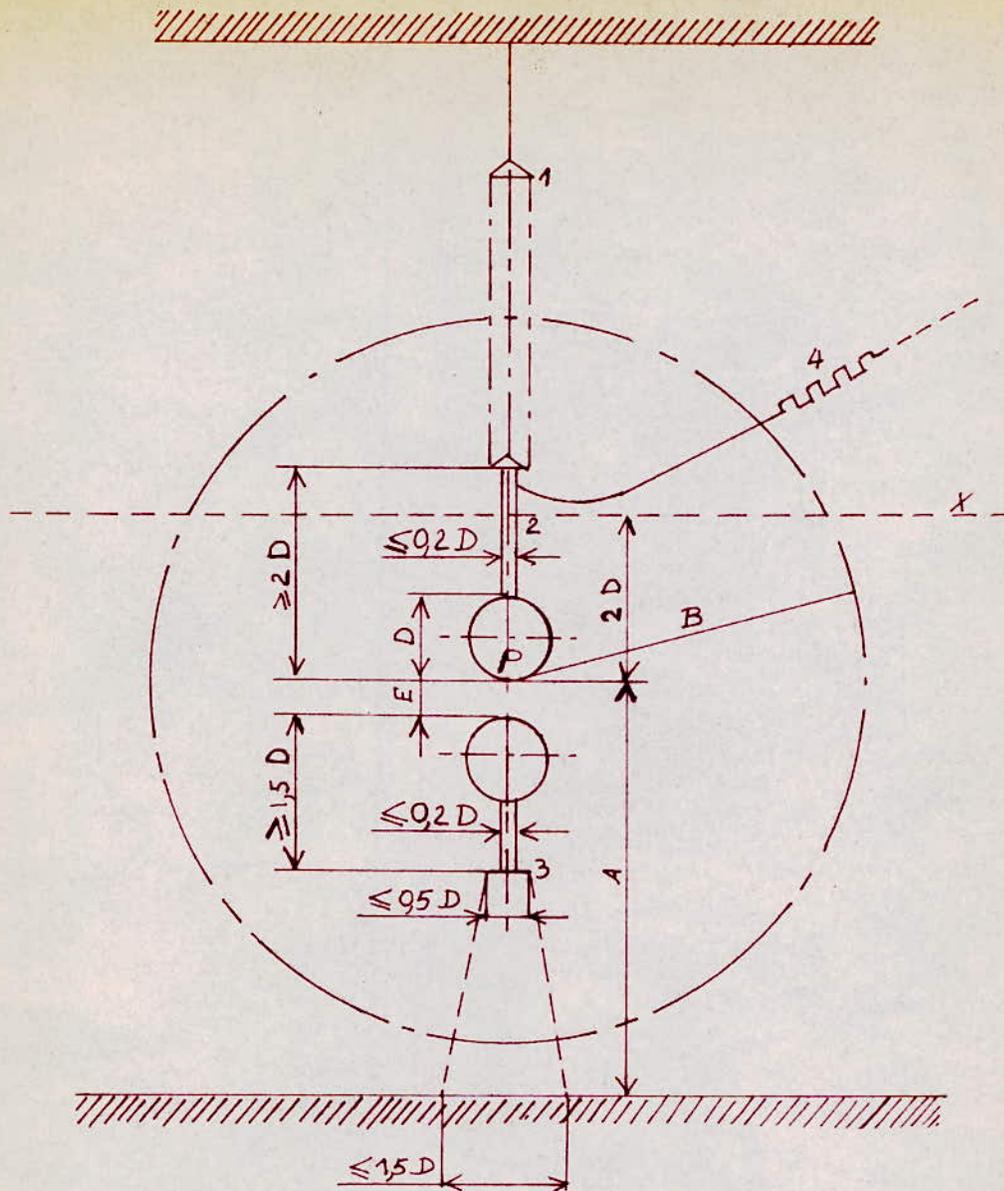


Fig. 2.2.

Eclateur à axe perpendiculaire au plan de terre  
(recommandations CEI)

- 1 Support isolant.
- 2 Tige support de la sphère
- 3 Mécanisme de manœuvre
- 4 Connexion à haute tension avec résistance en série
- A Distance de P au plan de terre
- B Distance de P à tout objet étranger
- P. Point de décharge de la sphère sous tension
- X. Plan normal à l'axe de l'éclateur

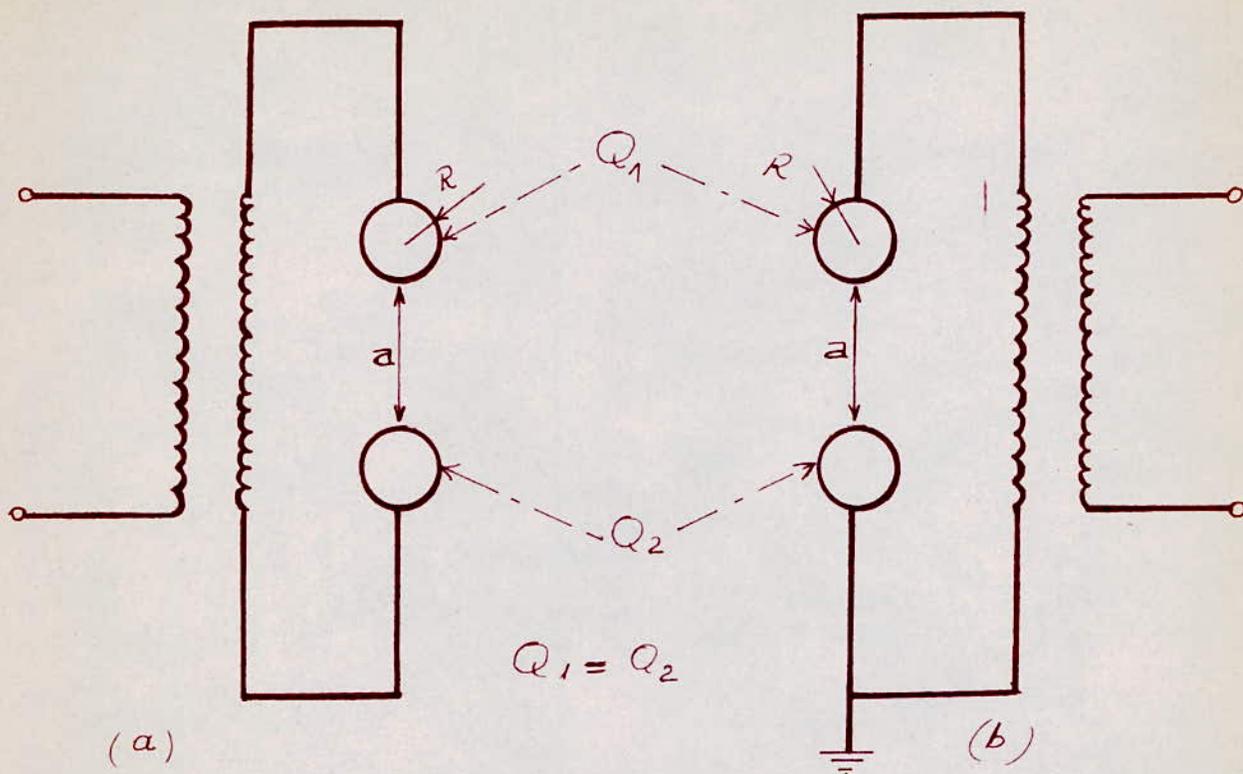


Fig. 2.3.  
Schéma de principe d'un éclateur à sphères :

- a) à deux sphères isolées (cas où  $\beta = \beta_s = f(a/R)$ )
- b) à une sphère isolée et l'autre mise à la terre (cas où  $\beta = \beta_0 = f(a/R)$ )

L'intensité du champ est influencée par l'état de surfaces des sphères et c'est la raison pour laquelle on doit s'assurer de leurs bonnes qualités. Pour ce faire, on est tenu à les nettoyer en veillant à ne déposer aucune matière, sinon, les lignes de champ subissent des déformations et donneront lieu à des résultats erronés.

L'intensité du champ entre les sphères doit donc être distribué de la façon la plus homogène pour que les mesures soient suffisamment précises.

Les normes nationales et les recommandations de la C.E.I définissent les conditions sous lesquelles les tensions peuvent être mesurées (par exemple, dans la publication n°52. de la C.E.I, on donne les tableaux de choix de diamètres des sphères, de leur écartement, de leurs distances de garde, de l'état de leurs surfaces et de l'influence de l'air).

D'autre part, lorsque l'éclateur est sous tension, une capacité prend naissance entre lui et le plan terre ; ce qui introduit d'autres paramètres parasites d'influence sur la tension d'amorçage qui viennent s'ajouter à ceux déjà cités précédemment. Des distances limitées entre sphères et plan terre doivent donc être respectées, ce qui est aussi spécifié dans la publication n°52 de la C.E.I.

Il ressort de ce qu'on vient d'étudier que pour pouvoir procéder aux mesures de tensions de choc, il est nécessaire de suivre un programme de mise en marche de l'éclateur, permettant le bon déroulement de essais.

- Manipulation pour la mesure de tensions de choc avec l'éclateur à sphères.

Pour mesurer la tension fournie par un générateur de choc à l'aide d'un éclateur à sphères, on procède d'abord

à un réglage d'écartement des sphères suffisant pour éviter l'amorçage. On applique ensuite à l'éclateur, la tension de choc à mesurer (avec une cadence de 5 s). L'étape suivante consiste à diminuer la distance entre sphères jusqu'à amorçage. La tension fournie par le générateur est déduite de l'écartement ainsi déterminée.

Remarquons : que l'emploi de l'éclateur à sphères n'est valable pour la mesure d'une tension d'amorçage d'un objet branché en parallèle avec l'éclateur de mesure qu'à condition que le retard à l'amorçage de l'objet en essai soit plus grand que le retard à l'amorçage de l'éclateur.

#### Facteurs influençant la mesure de la tension

- Influence des conditions d'ambiance (P, T, humidité) :

La tension de claquage est influencée considérablement par la densité de l'air et son humidité

Elle croit avec l'augmentation de la température et la diminution de la pression. (6)

D'autre part, quand l'humidité augmente, la masse des électrons dans l'air augmente ; ils perdent alors leurs mobilités donc leur pouvoir ionisant. En conséquence la valeur de la tension de claquage augmente.

Il est donc nécessaire d'introduire des facteurs de corrections pour ramener la tension mesurée aux conditions de référence. Ces facteurs sont le facteur de correction de densité de l'air  $K_d$  et le facteur de correction de l'humidité de l'air  $K_h$ .

Si  $U_n$  est la valeur de tension d'essai prise des normes (T.2.2), la tension mesurée sera :

$$U_{\text{mesurée}} = K_d \cdot K_h \cdot U_n$$

Tension nominale de service ( Kv. eff)		72,5	100	123	145	170	245	300	362	420	525	765
Tension de tenue au choc de foudre  (1,2/50 µs)	Isolation pleine (Kv-Crête)	325	450	550	650	750	1050					
	Isolation réduite (Kv-crête)		380	450	550	650	900	1175	1300	1550	1675	2150

Tableau T.2.2: Valeurs des tensions d'essais en fonction des tensions nominales selon les recommandations de la C.B.I.

Reciproquement, on peut ramener la tension d'essai exprimée dans les conditions de référence aux conditions d'ambiance :

$$U_n = \frac{1}{K_d \cdot K_h} U_{\text{mesurée}}$$

Conditions atmosphériques de référence :

Ces conditions sont :

- La température  $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- La pression  $b_0 = 1013 \text{ mbars}$
- L'humidité  $h_0 = 11 \text{ g d'eau/ m}^3$ .

Facteur de correction de densité de l'air :

Si  $b$  est la pression atmosphérique exprimée en millibars et  $t$  la température en degré celsius, le facteur de correction par rapport aux conditions de référence sera :

$$K_d = \frac{b}{1013} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} = 0,289 \cdot \frac{b}{273 + t}$$

Dans le cas où  $b$  est une valeur lue sur une colonne de mercure, il faut la ramener à la température de  $0^\circ\text{C}$  et à l'accélération normale de la pesanteur.

$$b = \frac{1013}{760} H \cdot (1 - 1,8 \cdot 10^{-4} t)$$

où  $H$  est la hauteur de mercure en mm à la température  $t^\circ\text{C}$

Facteur de correction de l'humidité de l'air

La figure 2.4 donne la valeur de  $\frac{1}{K_h}$  en fonction de l'humidité de l'air.

- Influence de la pesanteur

L'accélération de la pesanteur a une influence sur la tension mesurée mais qui est négligeable.

- Influence de l'irradiation de l'éclateur

La tension d'amorçage est aussi influencée par l'irradiation de l'intervalle entre les sphères. Cette irradiation peut diminuer le retard à l'amorçage, pour cela on utilise une irradiation supplémentaire.(7)

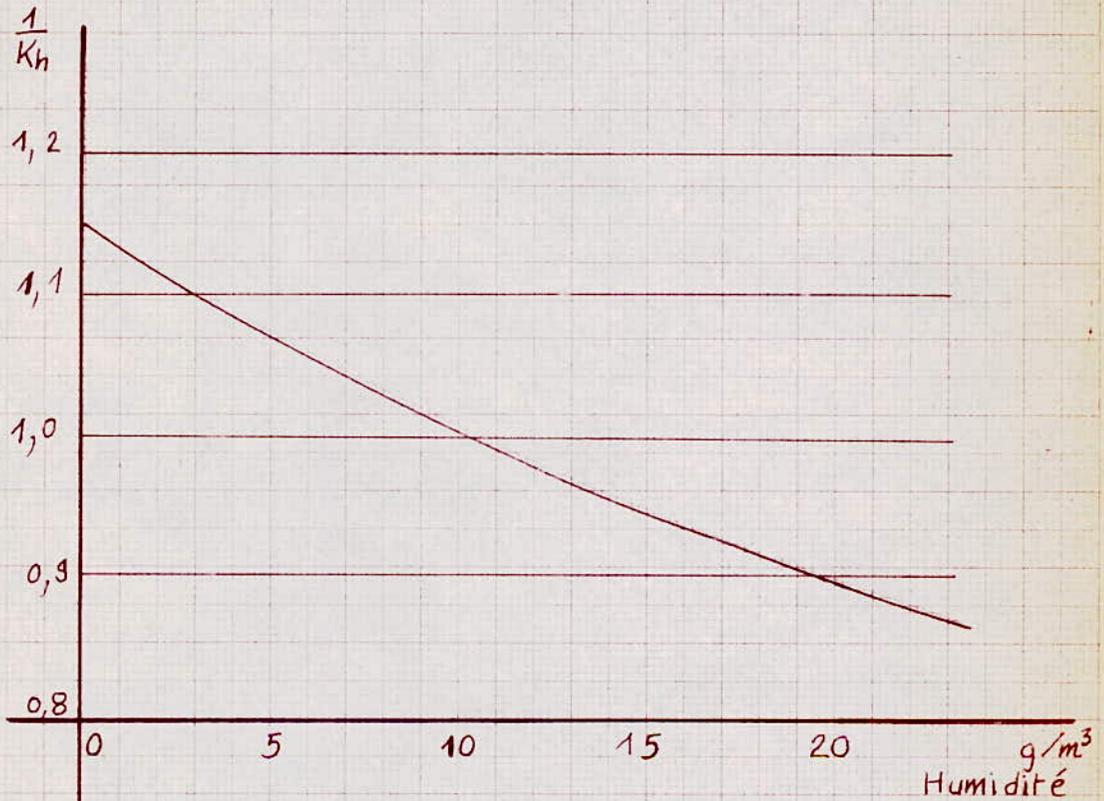


Fig. 2.4.

Facteur de correction de l'humidité  
selon la pratique européenne.

### 2.3. - MESURE A L'OSCILLOGRAPHHE CATHODIQUE

L'oscillographe cathodique sert pour l'enregistrement de la courbe complète des ondes de choc de très courtes durées, cette courbe nous permet de relever d'une part la valeur maximale de la tension et de suivre d'autre part le parcours de l'onde tout au long de son évolution. Nous nous intéressons ici uniquement à la valeur maximale de la tension de choc.

L'oscillographe cathodique est constitué essentiellement par :

- Un canon à électrons ;
- Deux systèmes de déviation électrostatique du faisceau d'électrons : l'un correspondant à la tension étudiée et l'autre au balayage ;
- Un écran fluorescent.

Le canon à électrons constitue le système de production et de contrôle du faisceau d'électrons obtenu par émission thermoélectronique de la cathode.

Ce faisceau est soumis à deux champs électrostatiques  $E_1$  et  $E_2$  dérivant de deux tensions  $V_1$  et  $V_2$  appliquées à deux systèmes de plaques déviateurices  $P_1$  et  $P_1'$  et  $P_2$  et  $P_2'$  ;  $V_1$  et  $V_2$  états respectivement la tension de balayage (base de temps) et la tension à mesurer (voir fig.2.5). (8)

Le spot à observer sur l'écran fluorescent subira alors une déviation  $x = K_1 V_1$  parallèle à  $E_1$  et une déviation  $y = K_2 V_2$  parallèle à  $E_2$  ( $K_1$  et  $K_2$  constantes).

Lorsque les deux plaques  $P_1$  et  $P_1'$  sont sous tension, le spot décrit une droite dont la longueur mesure l'amplitude de la tension d'essai. Pour déterminer sa variation en fonction du ~~signe~~ temps, on utilise les plaques  $P_1$  et  $P_1'$  de sorte que le spot balaye horizontalement l'écran d'une manière uniforme.

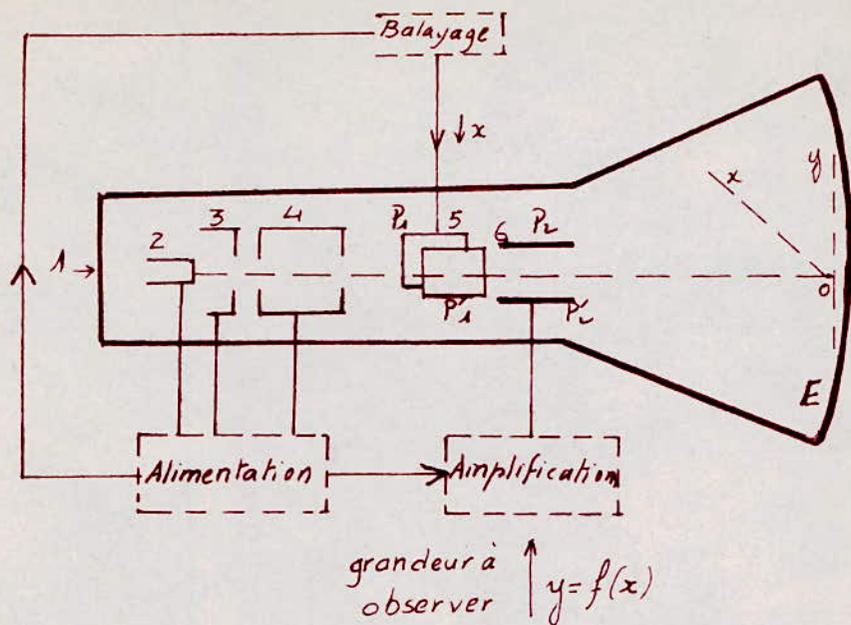


Fig. 2.5.

Schéma de principe d'un oscillographe cathodique

1. Tube cathodique ;
2. Cathode ;
3. Grille de contrôle ;
4. Concentration ;
5. Dispositif de déviation horizontale du faisceau (base de temps) ;
6. Dispositif de déviation soumis à la grandeur à observer ( $y=f(t)$ ) .
- E. Écran fluorescent.

L'une des méthodes pour obtenir cela est de relier P1 et P1 à un circuit comportant un condensateur qui se charge progressivement par le courant de saturation d'une diode, puis se décharge brusquement, se charge à nouveau et ainsi de suite.

La courbe  $y = f(x)$  reproduit, à un facteur multiplicatif près, la courbe  $V_2 = f(t)$ .

Comme on vient de le voir, l'oscillographe cathodique utilise des plaques aux bornes desquelles sont appliquées des tensions.

La forme de ces plaques peut avoir une grande influence sur l'homogénéité de distribution du champ électrique à cause des effets de bord. Pour supprimer cet effet de bord, on procède à l'évasement de ces plaques et dans ces conditions, le champ électrique sera uniforme ; on pourra alors écrire :

$$E = \frac{V}{d}$$

où  $d$  est la distance entre les plaques et  $V$  la tension qui lui est appliquée.

Un autre problème très important rencontré lors de l'utilisation des oscillographes cathodiques, et qu'on va développer, est celui de son déclenchement.

#### - Déclenchement de l'oscillographe cathodique

Pour que l'enregistrement du phénomène étudié soit intégral, il est nécessaire que les circuits d'allumage et de balayage du spot aient le temps de réagir juste avant l'arrivée du signal utile. Pour ce faire, on utilise plusieurs moyens dont l'antenne et le câble de raccordements.

Une antenne placée à proximité de l'étincelle de décharge du générateur de choc permet de déclencher l'oscillographe un peu avant l'arrivée du signal étudié, l'étincelle précédant légèrement le phénomène considéré. Cette méthode est peu précise car l'emplacement et le choix de la longueur de l'antenne s'effectuent par tâtonnement.

D'autre part comme l'antenne est plongée dans un champ perturbateur intense pendant l'évolution du phénomène, les circuits de balayage risquent d'être troublés.

Un autre moyen consiste à déclencher le balayage par l'intermédiaire du signal à enregistrer et à retarder son arrivée entre les plaques de déviation (P2 et P2'). Pour cela, il est nécessaire d'insérer entre les deux systèmes de plaques un câble correspondant à l'avance du déclenchement.

On peut aussi déclencher l'oscillographe par un dispositif électronique appelé trigatron. Ce dernier permet, grâce à des câbles retardateurs, de mettre en marche le dispositif d'enregistrement de la tension juste avant l'allumage du générateur, dès que la tension de charge du condensateur de choc du premier étage du générateur atteint la valeur désirée. (9)

Lors de la production de décharges H.T., le champ électromagnétique qui prend naissance introduit des perturbations gênant le bon fonctionnement des dispositifs si certaines précautions ne sont pas prises. Il est donc nécessaire d'éloigner l'appareil ou de le placer dans une enceinte blindée pour le protéger contre l'influence des champs extérieurs. Ceci dans le but de permettre un enregistrement convenable que l'on pourra photographier et conserver l'oscillogramme.

## 2.4. - MESURE AU VOLTMETRE DE CRETE

Le voltmètre de crête sert surtout à mesurer la valeur de crête de tensions de chocs.

Il offre l'avantage d'une lecture directe alors que l'oscillographe ne livre le résultat de la mesure qu'après un développement et un examen des oscillogrammes. Il trouve son utilisation dans les laboratoires d'essais à H.T. et dans les centres de recherches. Il permet un travail particulièrement rationnel lorsqu'il s'agit d'interpréter **sur** une base statistique les valeurs de crête d'un grand nombre de chocs. C'est en général le cas pour des essais de matériel isolant (bornes, supports, isolateurs) de parafoudres, de câbles, etc... On l'utilise très souvent pour la mesure de répartition des tensions de foudre le long de l'enroulement H.T. d'un transformateur.

Il présente aussi de grands avantages **et** pour l'essai à l'échelle individuelle d'autres équipements à haute tension.

Avec un oscillographe électronique (cathodique), le voltmètre de choc constitue un précieux équipement complémentaire permettant d'effectuer les mesures complètes de tensions de chocs et de façon rapide. L'oscillographe reste toutefois indispensable à l'enregistrement de la forme des ondes de chocs.

Actuellement, on rencontre deux types de voltmètres de crête : le voltmètre de crête balistique et le voltmètre de crête à mémoire.

### Voltmètre de crête balistique

Le principe de fonctionnement du voltmètre de crête balistique est basé sur la charge d'un condensateur C de valeur rigoureusement connue, à travers un redresseur D (fig.2.6) au moyen de la tension à mesurer. (2)

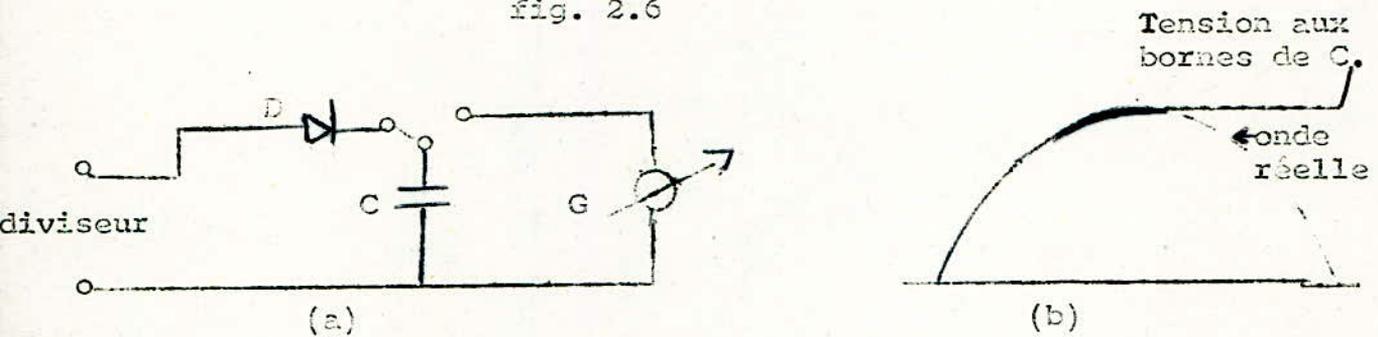
Lorsque la valeur de crête  $U_c$  est atteinte, l'effet de blocage du redresseur en sens inverse, empêche le condensateur de se décharger.

Par l'intermédiaire d'un inverseur on applique le condensateur aux bornes du galvanomètre balistique  $G$  qui indique en lecture directe sa charge  $Q$  d'où  $U_c$  :

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^T i \cdot dt = \frac{1}{C} \cdot Q$$

où  $i$  est le courant de charge et  $T$  la durée de charge du condensateur.

fig. 2.6



Voltmètre de crête balistique.

- a) Schéma de principe.
- b) Tension appliquée aux bornes du condensateur de mesure C.

La présence du redresseur (diode) dans cet appareil constitue la principale source d'erreur.

En effet un redresseur (diode par exemple) n'est jamais parfait puisqu'il possède toujours en sens direct un seuil (résistance directe  $R_d$ ), donc un retard  $R_d C$ .

D'autre part, en sens inverse, la barrière de potentiel ne se formant pas instantanément, entraîne une légère décharge de condensateur C après son application aux bornes du galvanomètre.

Un autre inconvénient de ce genre d'appareils, est celui de la lecture qui doit être prise au vol. Il est donc nécessaire d'augmenter le temps de décharge du condensateur pour permettre une lecture assez précise des valeurs à mesurer, c'est à dire d'introduire un système permettant leur mémorisation.

- Voltmètre de choc à mémoire

L'idée consiste à brancher en cascade plusieurs voltmètres de crête (étage) du type précédent (voir fig.2.7) avec des capacités de charge de plus en plus grandes. Le couplage de ces divers étages doit être tel, que la tension d'entrée d'un étage soit égale à celle de sortie de celui qui le précède. Pour cela, chaque étage sera connecté au suivant par l'intermédiaire d'un tube à montage cathodyne, dont la fonction est d'adapter le système.

La lecture est d'autant plus aisée que le nombre d'étages est élevé ainsi que le temps de réponse de chacun d'eux ; ce qui permet de conserver la valeur mesurée même après la disparition des phénomènes.

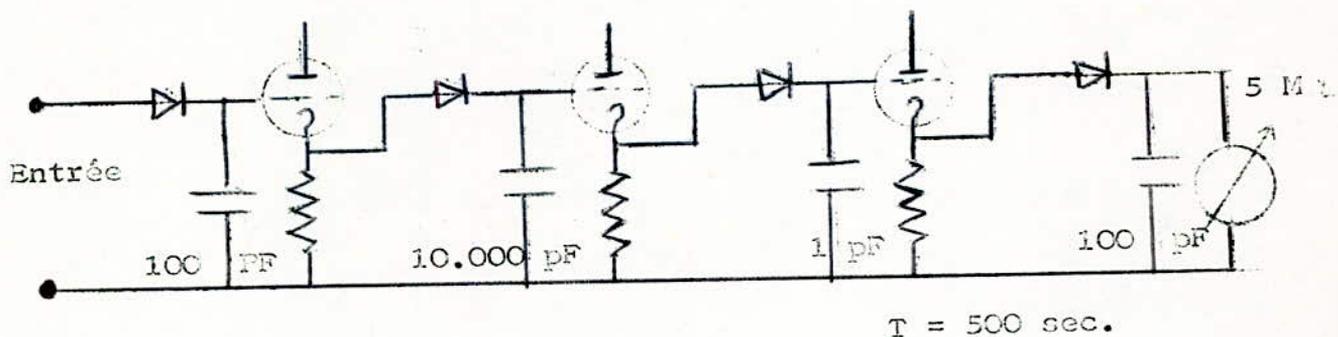


Fig. 2.7.

Schéma de principe du voltmètre de crête à mémoire. (2)

Chaque étage (J) est un quadripôle de fonction de transfert  $F_j$  et de temps de réponse  $T_j$ . Tous les quadripôles sont connectés en série et tels que la fonction de transfert de chacun d'eux ne soit pas modifiée par la présence du suivant (couplage total). Dans ces conditions la fonction de transfert résultante  $F_s$  est égale au produit des fonctions de transfert de chaque étage :

$$F_s = \prod_{j=1}^{j=n} F_j \quad , \quad n \text{ étant le nombre d'étages.}$$

D'autre part en vertu des relations théoriques entre réponse indicielle, temps de réponse et fonction de transfert (voir techniques générales du Laboratoire de physique "2ème édition - page 213 de J. SURUGUE par C. GARY), le temps de réponse  $T_s$  du système est égal à :

$$T_s = \sum_{j=1}^{j=n} T_j.$$

De ceci, il apparait que le temps de réponse du voltmètre de crête ainsi conçu est fonction du temps de réponse de chaque étage.

En pratique, le signal d'entrée est soumis à l'influence de divers autres circuits (stabilisateur, circuit électronique..) avant d'arriver à l'instrument de mesure. D'autre constante de temps sont donc à prendre en considération dans le temps réponse du voltmètre de crête dont le schéma de principe se trouve dans la figure 2.7

La lecture des valeurs mesurées est faite directement sur le cadran de l'instrument. Sa qualité dépend beaucoup de l'opérateur c'est pour cette raison qu'on utilise actuellement des appareils électroniques qui affiche directement la valeur numérique de la tension mesurée.

Dans le cas, où l'on désire enregistrer les valeurs mesurées, on connecte au voltmètre de choc un appareil enregistreur automatique complémentaire.

MISE EN SERVICE DU VOLTMETRE DE CHOC DE L'ENPA

3.1. - GENERALITES

Le voltmètre de crête de l'ENPA est un appareil qui sert à mesurer la valeur de crête de tensions d'ondes de choc ou périodiques et sous certaines conditions limites à effectuer des mesures de tensions continues. Il mesure les valeurs de crête simple (et non pas crête à crête) de polarité positive ou négative dont l'amplitude maximale peut atteindre 1600V.

Le voltmètre de crête permet de mesurer de hautes tensions dont la valeur dépend du diviseur de tension auquel il peut être connecté.

Dans ce chapitre, seront données les caractéristiques principales du voltmètre de crête dont nous disposons à l'ENPA et les mesures prises pour sa mise en marche. Ces données sont basées sur de la documentation du fournisseur de l'appareil (10).

3.2. - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU VOLTMETRE DE CHOC DE L'ENPA

Le principe de fonctionnement du voltmètre de choc de l'ENPA est identique à celui qu'on a indiqué dans le chapitre précédent. Il comporte des unités permettant le bon traitement du signal à mesurer (stabilisateur, circuit électronique pour l'affichage,...).

Le schéma de fonctionnement de ce voltmètre est représenté sur la figure 3.1. D'après ce schéma, le signal à mesurer (tension du secondaire du diviseur de tension) est amené au diviseur d'entrée (impulse divider) où il est affaibli à une valeur convenable pour l'amplificateur opérationnel à l'aide d'un atténuateur.

Le signal passe ensuite par un sélecteur de polarité pour pénétrer dans le premier bloc de mémoire (ANALOG STORE I) qui constitue le premier étage d'accumulation. Par la suite le signal est injecté au deuxième bloc de mémoire (ou 2ème étage d'accumulation), où sous forme d'une valeur analogique, il sera disponible pour l'opération suivante. La constante de temps de décharge de cette deuxième mémoire est fonction du mode choisis ("Impulse", "check" ou AC/DC). Le signal analogique mémorisé peut être retiré à chaque instant à l'aide de "RESET" manuel. De cette deuxième mémoire le signal est pris pour le départ du transmetteur analogique digital ainsi que pour d'autres unités d'affichage (trigger signal). A l'apparition d'un nouveau choc, la valeur indiquée disparaît pour permettre l'affichage de la nouvelle valeur.

### 3.3. - PARTIES CONSTITUTIONNELLES ET ACCESSOIRES

L'appareil est monté dans un boîtier métallique et possède un amortissement très élevé contre la pénétration des ondes électromagnétiques. Il est aussi protégé contre une mise sous tension de sa masse et contre les surcharges.

Les parois latérales mobiles de l'appareil facilitent l'accès aux circuits internes et permettent ainsi de distinguer ses différentes parties constitutionnelles. Il est constitué d'unités fondamentales suivantes :

- Un diviseur d'entrée (INPUT DIVIDER) ;
- Un premier étage d'accumulation (ANALOG STORE 1) ;
- Un deuxième étage d'accumulation (ANALOG STORE 2) ;
- Un voltmètre digital (VDM) ;
- Un stabilisateur de tension (VOLTAGE STABILIZER) ;
- Un circuit d'alimentation en tension du circuit d'entrée (POWER SUPPLY).

Chacune de ces unités a un rôle bien défini tel qu'on peut le voir sur la figure 3.1. et que nous allons étudier plus en détails.

### - Diviseur d'entrée

Le diviseur d'entrée est exécuté comme un diviseur R-CR. Il est constitué d'une partie primaire et de quatre parties secondaires correspondants aux positions d'atténuation K1, K2, K4, K8, ces quatre parties secondaires peuvent être connectées en parallèle au moyen de trois relais K1, K2 et K3 (voir fig.3.2.).

Des condensateurs ajustables installés en différentes branches, permettent d'accorder le comportement de transmission du diviseur. Du diviseur d'entrée, le signal est couplé avec un amplificateur A1 par une haute impédance et amené à la sortie (point de mesure B).

Deux diodes (V1 et V2) servent de protection pour l'amplificateur opérationnel contre les surtensions. Cet amplificateur est aussi protégé contre les augmentations trop brusques de tensions par un élément de temps installé dans le diviseur d'entrée. Un potentiomètre (R6) sert à la compensation "Off. set" de l'amplificateur A1. Une tension de vérification d'environ 7,2 v (180 v indiquée) est apportée directement à l'entrée de l'amplificateur A1 (point de mesure A).

### - Le premier étage d'accumulation

Cet étage est précédé d'un relai (K1) qui permet de choisir la polarité d'accumulation. Une fois la polarité choisie le signal passe à travers un amplificateur (A2) et deux diodes (V2 et V3) pour charger le condensateur d'accumulation (C7) à la valeur de crête de la tension à mesurer.

L'amplificateur A1 du diviseur d'entrée couple le signal de mesure par une haute impédance et le conduit à l'entrée de l'amplificateur du premier étage d'accumulation par le circuit de couplage inverse (R2, R3, C3). Immédiatement après que le condensateur de charge (C7) ait atteint la valeur de crête, les deux diodes (V2 et V3) le séparent de l'amplificateur A2. L'amplificateur A2 oscillera ensuite avec une polarité inverse jusqu'à ce qu'il sera arrêté par le circuit de couplage inverse (V1, R5).

Ces amplificateurs opérationnels peuvent être commandés jusqu'à une tension d'environ 8v maximum. D'autre part, une résistance R4. permet de compenser la tension "Off-set". de l'amplificateur A2 pour le voltmètre (voir fig.3.2.).

#### - Le deuxième étage d'accumulation

Ce deuxième étage a pour rôle d'augmenter la capacité d'accumulation. Le condensateur d'accumulation est, de même que pour le premier étage chargé à travers deux diodes et un amplificateur. Un autre amplificateur découple le signal par haute impédance et le reconduit à l'amplificateur d'entrée précédent, dont la sortie est protégée en cas de surmodulation. Divers circuit de couplage inverse assurent la protection de la connexion d'accumulation contre les sur-oscillations.

À l'apparition du signal de mesure, la sortie du "trigger" donne la logique 0 et ce jusqu'à atteinte de la valeur de crête, auquel cas la sortie de l'amplificateur d'entrée fonctionnera dans le sens négatif ; la sortie du "trigger" passe alors dans la logique 1.

Le signal est ensuite apporté de la sortie de l'amplificateur du deuxième étage à l'entrée de l'instrument digital par des diviseurs résistants. (la constante de temps de décharge est de 200 sec).

### - Voltmètre digital

Le voltmètre digital emploie le signal du deuxième étage d'accumulation. Il comprend le transformateur analogique digital, les opérateurs pour l'augmentation digitale de la valeur à mesurer et les indicateurs  $3 \frac{1}{2}$  décades.

Le signal est affiché et peut être à la disposition (pour d'autres opérations par exemple pour enregistrement), aussi comme le signal BCD dans le niveau T.T.L à la sortie du voltmètre digital.

Les éléments de commutation qui sont destinés à la production des signaux qui doivent être lus sont montés sur le circuit de retard VDM. L'alimentation du voltmètre digital est assurée par un niveau de tension de + 5V en courant continu (DC).

### - Stabilisateur de tension

Les tensions d'alimentation (+15V, -15V, +5V) nécessaires aux éléments de commutation sont stabilisées à l'aide des circuits imprimés. On utilise trois stabilisateurs intégrés (pour + 15V, -15V, + 5V).

Des inductances sont utilisées pour l'alimentation des processus rapides de réglage et des condensateurs pour le filtrage et la stabilisation.

### - Alimentation en tension du circuit d'entrée

L'appareil peut être alimenté du réseau, à l'aide d'un commutateur, avec 220V ou 110V, aux fréquences de 50 Hz à 60 Hz. Les surtensions sont puissamment atténuées à l'aide de circuits de filtrage. Tout l'instrument est lié avec une terre de choc.

Un transformateur d'isolement (T1) sépare les circuits de mesure de l'instrument par rapport au circuit d'alimentation.

Dans la partie primaire de (T1), il y a aussi une adaptation de la tension 110/220 v.

Le transformateur d'isolement (T1) travaille avec les circuits suivants (L-C) qui servent aussi pour l'atténuation. Les surtensions trop hautes sont bloquées à l'aide de détourneurs de tensions (F3, F4, F5).

A. l'aide d'un interrupteur de puissance (S3) on alimente le transformateur T2 qui produit les tensions nécessaires à l'alimentation des stabilisateurs.

L'instrument est muni de coupe circuit (F1, F2) qui travaillent d'une manière relative dans la partie primaire du transformateur T2. (fig.3.3). Pour les fortes variations de la tension d'alimentation par rapport à la valeur maximale, le rapport de transmission du transformateur T2 peut être modifiée avec  $\pm 10\%$  (c'est à dire qu'on accepte des variations de tension de  $\pm 10\%$ ).

#### - REMARQUE

Afin de pouvoir mesurer les valeurs de crête des ondes rapidement variables dont la raideur du  $/dt$  est très grande, la capacité mémorisante du condensateur est choisie très petite de façon à avoir une constante de temps de décharges relativement petite.

Pour obtenir une constante de temps de décharge sensiblement plus grande, on effectue une transformation de l'impédance (augmentation de la capacité d'accumulation) à l'aide d'éléments actifs d'amplification. La valeur de crête peut être conservée durant un temps plus long.

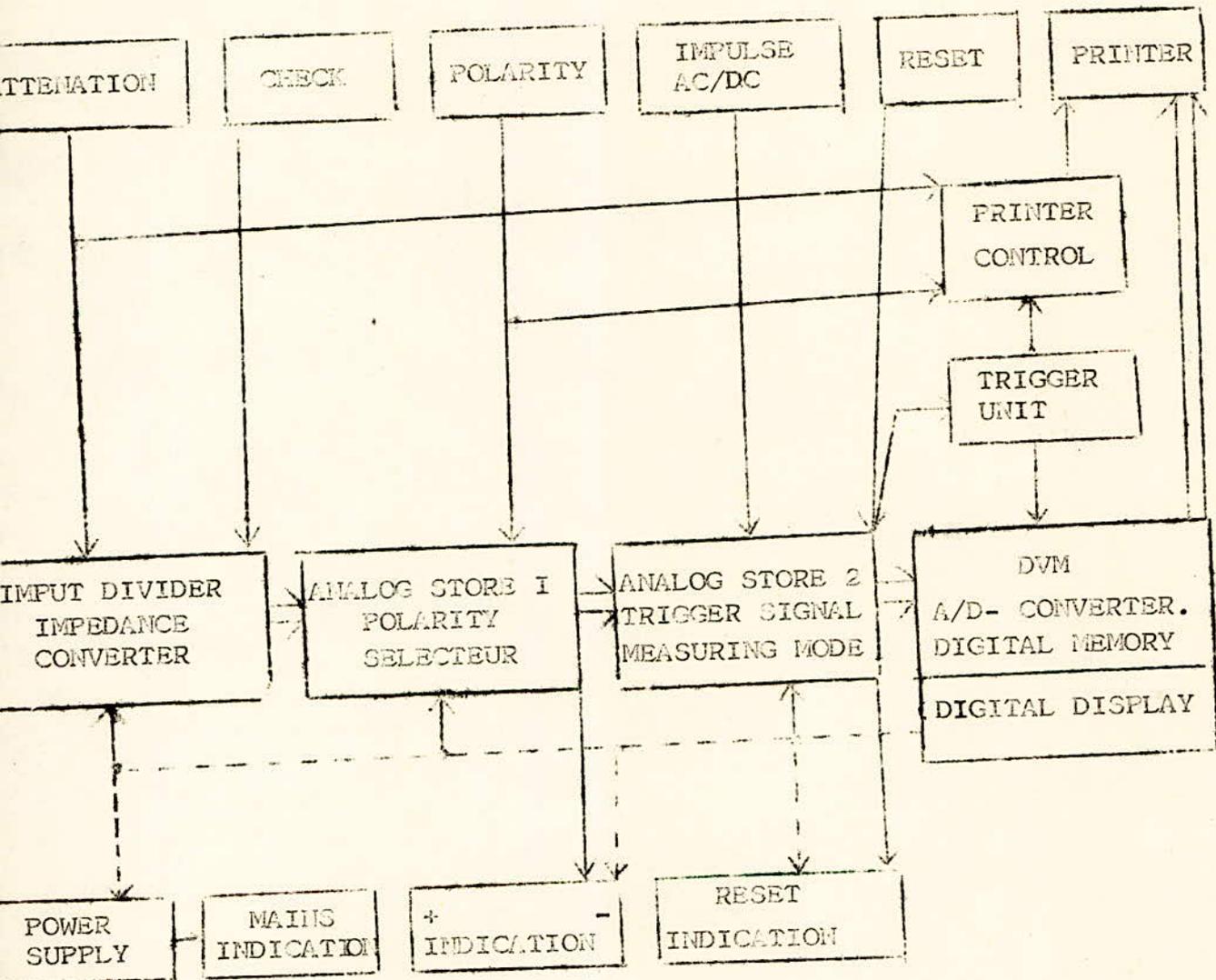


fig. 3.4.

Schéma de principe de fonctionnement du  
voltmètre de crête de l'ENPA  
( d'après le catalogue HAEFELY )

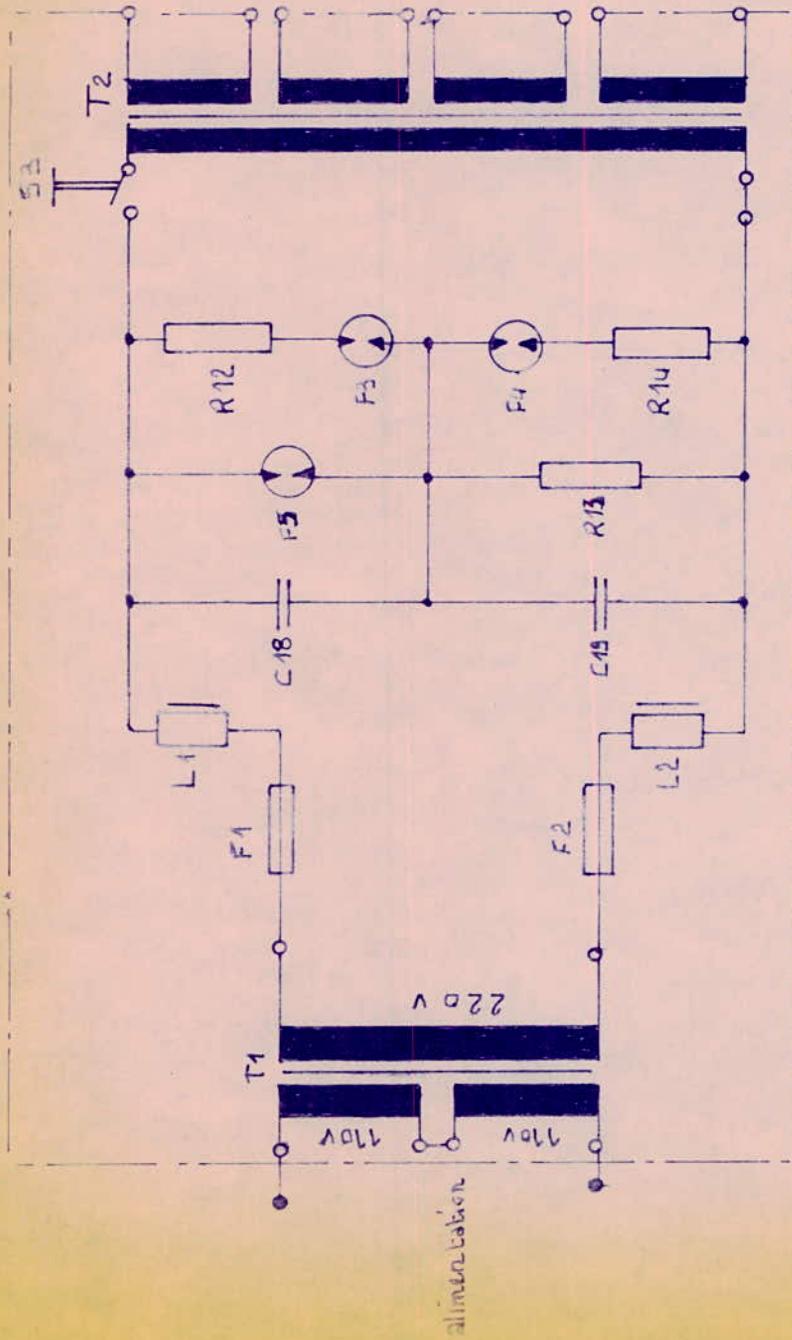


Fig 3.3 Schema du circuit d'alimentation du voltmètre

### 3.4. - ORGANES DE COMMANDE ET PRISES DE RACCORDEMENTS :

Les organes de commande sont disposés sur le panneau frontal tandis que les diverses prises de connexion et d'alimentation sont placées à l'arrière de l'appareil (Fig.3.4.)

#### - Tension d'alimentation :

Le voltmètre est connecté à la tension du réseau par l'intermédiaire d'une prise de courant. A partir de cette prise, l'appareil peut être alimenté soit par une tension de 110V, soit de 220V, 50 Hz ou 60 Hz en fonction d'une connexion à effectuer à l'intérieur de l'appareil.

Un bouton "POWER" se trouvant sur la partie frontale permet de mettre l'appareil sous tension.

#### - Signal de mesure

L'une des deux prises Lemo se trouvant sur la surface arrière permet l'injection du signal à mesurer dans l'appareil. L'autre prise servant au raccordement de la résistance terminale.

Le signal mesuré peut être recueilli sur d'autres instruments (enregistreur par exemple) pouvant être connectés à la prise multiple (Data output) et permettant de fournir toutes les informations concernant le signal étudié, ce qui constituera un moyen de vérification du bon fonctionnement de notre appareil.

#### - Mise à la terre

La mise à la terre peut s'effectuer par l'intermédiaire d'une borne de terre disponible à l'arrière de l'appareil. L'écran du câble coaxial et les contacts métalliques à l'intérieur, constituent déjà un moyen de mise à la terre de l'appareil.

#### - Commutateur : sensibilité X1, X2, ~~X3~~, X4, X8

Ce commutateur permet de choisir le signal sur une plage allant de 200 à 1600V, en fonction de la précision, la valeur indiquée sur l'appareil doit être le plus possible la valeur 199V.

- Bouton "Polarité"

Avec cet interrupteur, on peut choisir la polarité (positive ou négative) du signal à mesurer.

- Commutateur de sélection : Impulsion - AC/DC - Check.

Ce commutateur se trouve dans la partie frontale. Il permet de choisir le mode de service selon sa position :

Impulse :

La position "Impulse" sert à mémoriser les signaux de mesures unipolaires non répétés. L'affichage digital persiste jusqu'à apparition d'une nouvelle impulsion qui effacera la première pour céder la place à l'affichage de la nouvelle valeur. Le retour à la position initiale de la mémoire analogique intervient après chaque impulsion avec un retard d'1 s. environ.

AC/DC.

Dans ce cas le signal est mesuré périodiquement et la valeur correspondante est affichée. La mémoire analogique se décharge avec une constante de temps de 10 sec. environ.

Check

Cette position permet la vérification de l'instrument et en particulier celle du gain (c.a.d. le rendement de l'instrument sans affaiblissement du signal d'entrée). L'affichage doit indiquer la valeur de polarité correspondante  $\pm 180 \text{ v} \pm 0,5 \%$ .

- Bouton "RESET"

Par l'intermédiaire du bouton "RESET", on peut à chaque instant, raccorder l'instrument à la grandeur de sortie. Durant le temps de retour (RESET) de la mémoire analogique, le bouton reste allumé. Il peut être allumé pour la position "Impulse" mais pendant une courte durée. Ces signaux servent comme contrôle de service.

- Affichage

L'affichage contenant 3,5 décades peut indiquer au maximum 199,9V. Une combinaison de signes spéciaux apparaît au cas où cette valeur est dépassée. En poussant le bouton RESET, l'appareil doit indiquer OV.

La valeur mesurée est effectuée dans la logique T.T.L en forme de code BCD.

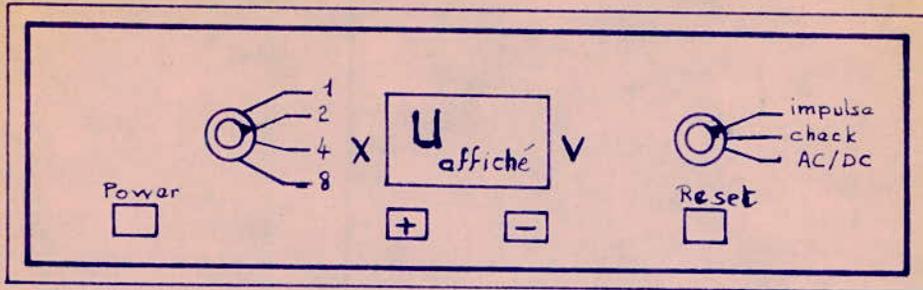
fig 3.4

prises de raccordements et organes de commande :

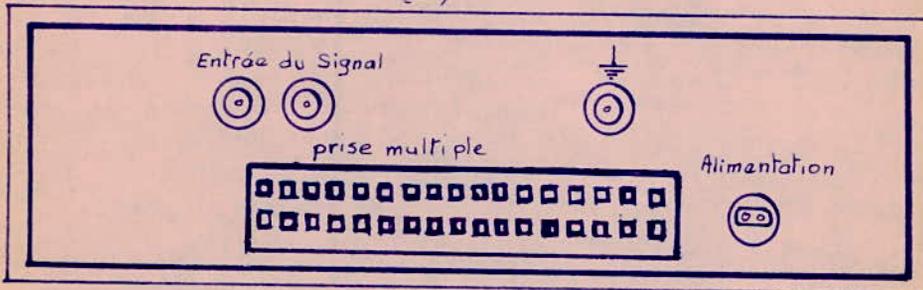
a) schéma de la face frontale .

b) schéma de la face arrière .

(a)



(b)



### 3.5. - CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU VOLTMETRE DE CHOC DE L'ENEA.

Les caractéristiques techniques de l'appareil sont données par le constructeur.

#### Tensions d'entrée :

- Jusqu'à 1600V, valeur de crête unipolaire (positive ou négative) dont la durée maximale est de 1 seconde.
- Jusqu'à 800V de la valeur maximale pour la tension continue au alternative de durée indépendante.

#### Plage de mesure :

Position du commutateur	Impulsion	AC/DC.
X 1	0 - 200V	0 - 200V
X 2	0 - 400V	0 - 400V
X 4	0 - 800V	(0 - 800V )
X 8	0 - 1600V	(0 - 800V )

#### Indication :

3,5 décades - position du voltmètre digital avec des indications de surchage.

#### Signal de mesure de sortie :

Digital BCD - 3,5 décades parallèles avec la commande "Push" (T.T.L Logik Pegel)

#### Signal de mesure entrée :

deux prises Lemo type RA 4250.

<u>Temps de montée</u>	:	Ta = 65 ns
<u>Plage de fréquence</u>	:	fb = 4 M Hz
<u>Temps de chauffage</u>	:	10 mn
<u>Plage de température</u>	:	10 °C à 50 °C.

Précision :

La précision des mesures dépend de la forme de l'impulsion du phénomène étudié. D'après le diagramme de la figure 3.5, La précision est d'autant meilleure que la durée de front est proche de 1  $\mu$ s.

Pour les tensions de manoeuvre et de foudre, la précision est de  $\pm 1 \%$ . Il en est de même pour des tensions de foudre coupées après 0,5  $\mu$ s et celle de mi-amplitude de 5  $\mu$ s

Le choix de la position de l'atténuateur (X1, X2, X4, ou X8) est aussi important; plus la valeur affichée est proche de 199,9V et plus la précision est bonne.

Cette précision ( $\pm 1 \%$ ) est aussi valable pour la mesure des tensions alternatives et continues.

Puissance absorbée :

35 VA sous tension nominale.

Dimensions :

Tiroir normalisé 19" (en un seul bloc).

Boitier : 143 x 495 x 373 mm.

Poids : 13 Kg.

Impédance d'entrée :

1 M $\Omega$ /50 pF.

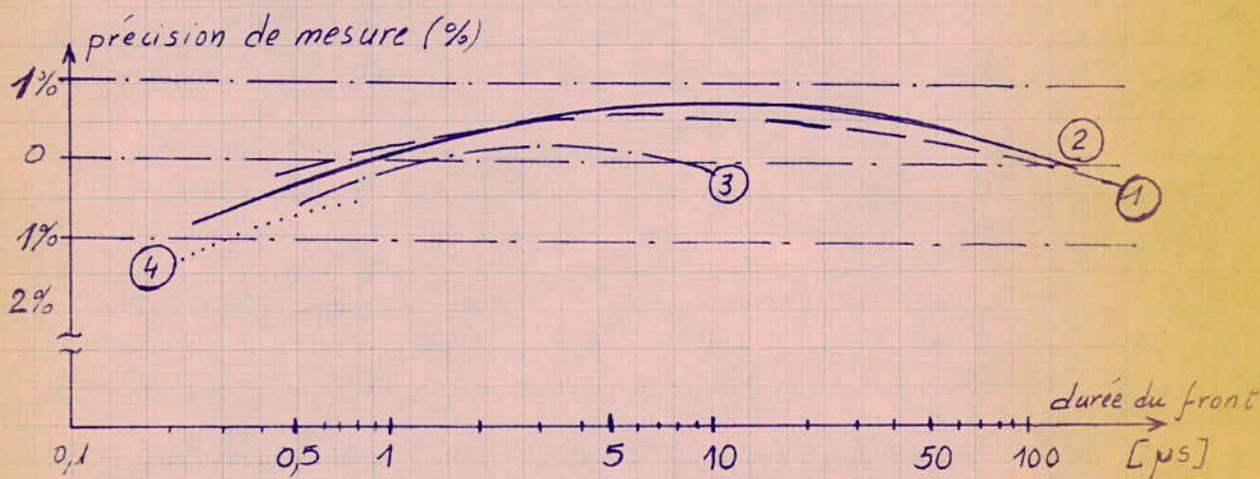


Fig. 3.5.

Courbes donnant la précision de mesure en fonction de la durée du front du signal étudié :

- ① tension de manœuvre ;
- ② tension de foudre ;
- ③ tension de foudre coupée.
- ④ tension de choc de durée du front  $0,25 \mu\text{s}$  et de durée de mi-amplitude  $5 \mu\text{s}$ .

(d'après le constructeur de l'appareil)

### 3.6. - REGLAGE ET VERIFICATION DE L'INSTRUMENT

Le réglage de l'instrument s'effectue extérieurement par des organes de commande disponibles sur le panneau frontal et intérieurement par ajustage de certains éléments (résistances et capacités variables) appartenant à différentes unités.

Avant toute mesure, on doit d'abord procéder au réglage statique en mettant l'instrument sous tension. Chaque unité doit être réglée au moyen de résistances potentiométriques de manière à ce que la valeur affichée soit  $000.0V \pm 1$  lorsqu'on court-circuite l'entrée du signal, cet ajustage doit se faire, dans l'ordre suivant : voltmètre digital (DVM), deuxième étage de mémoire, premier étage de mémoire, atténuateur d'entrée.

Par la suite, on vérifie la tension d'entrée en plaçant le commutateur de choix de mesure sur AC/DC et l'atténuateur en 1. En imposant une tension continue de 180V, préverifiée par un autre appareil, la valeur indiquée doit être 180V.

Après le réglage statique de l'atténuateur d'entrée, l'instrument doit fonctionner dans les 4 positions X1, X2, X4, X8. En position "Check", la valeur indiquée doit être  $180V \pm 1\%$ , sinon on procède à l'ajustage d'un potentiomètre (R10) jusqu'à son obtention.

Pour le réglage dynamique, le mieux est d'employer une tension de foudre  $1,2/50 \mu s$  d'une amplitude d'environ 180V car pour ces tensions on a la meilleure précision (voir fig.3.5). La valeur indiquée peut être prise comme référence avec le commutateur de choix sur "Impulse" et l'atténuateur sur X1. Dans le cas où l'écart est considérable, on doit corriger l'atténuateur dans la position X1 par des capacités variables.

### 3.7. - MISE EN SERVICE

Le voltmètre de crête est raccordé au secondaire du diviseur de tension auquel est appliqué l'onde de choc à haute tension devant être mesurée par l'intermédiaire du câble coaxial.

A L'ENPA, ce diviseur est du type ohmique dont la résistance de l'élément H.T est de  $20\text{ K}\Omega$  et celle de l'élément B.T. de  $72,78\text{ }\Omega$ . Cette impédance permet une bonne fidélité de transmission

Selon le type de diviseur de tension utilisé et la longueur du câble coaxial, le voltmètre de choc est ou non fermé sur une résistance terminale (non inductive de  $75$  ou  $50\text{ }\Omega$ ), ce qui est le cas du diviseur ohmique. Cette résistance externe permet d'adapter l'appareil à l'impédance d'onde du câble de mesure évitant ainsi toute réflexion à l'extrémité du câble.

Dans le cas d'enregistrement simultané de la forme de l'onde et de la valeur de crête, on branche le voltmètre de choc et l'oscillographe cathodique en parallèle. Ces deux instruments seront reliés par un câble de faible longueur pour limiter les pertes d'informations. Comme dans notre cas nous nous intéressons uniquement à la valeur de crête de tensions de choc, le voltmètre de crête sera connecté directement au câble coaxial ; il est donc nécessaire d'insérer la résistance terminale.

Ceci étant fait, on peut effectuer les mesures en procédant comme suit :

- Vérification des fusibles (F1 et F2) et des lampes d'indications.
- Mettre sous tension (la tension doit être vérifiée auparavant) et attendre 10 mn environ.
- Vérification du zéro de l'instrument.

- Positionnement de l'atténuateur de sensibilité (X1, X2, X4 ou X8). Cette position est fonction de la tension au secondaire du diviseur de tension qui doit être calculée d'après la valeur de crête de l'impulsion H.T qui elle, est connue.
- Commutateur de sélection du signal sur la position "Impulse".
- Commutateur de sélection de service sur la polarité choisie.
- La valeur de crête de l'impulsion H.T. est égale à la valeur lue, multipliée par le facteur de l'atténuateur du voltmètre de choc et le rapport du diviseur de tension.
- Si on veut enregistrer cette valeur par un instrument branché sur la prise multiple du voltmètre de choc, on appuie sur le bouton "RESET".
- La valeur affichée est effacée soit automatiquement dès l'arrivée d'une nouvelle valeur, soit manuellement en appuyant sur le bouton "RESET".
- En cas de défaut, on doit reprendre cette marche dès le début après avoir vérifié toutes les unités de l'instrument.

### 3.8 - VERIFICATION DU FONCTIONNEMENT

Nous avons voulu vérifier le fonctionnement du volt-  
mètre avec l'ensemble de l'équipement de la station de choc du  
laboratoire de l'ENPA. Dans ce but, le voltmètre de choc était  
connecté au bras B.T. du potentiomètre de choc, la borne H.T.  
étant reliée au générateur de choc. Les caractéristiques prin-  
cipales du potentiomètre et du générateur seront décrites ci-  
après.

Le générateur de choc de notre laboratoire est du type  
de Marx mobile, avec condensateurs en colonne. Le pupitre de com-  
mande et le redresseur sont montés sur le même châssis du généra-  
teur. Ce générateur a 8 étages ayant chacun une tension de charge  
nominale de 75 KV qui donne en série complète 8 x 75 KV soit  
600 KV; son énergie nominale est de 4 KWs (4KJ).

Le diviseur de tension est du type de potentiomètre avec  
répartition du champ linéaire, son rapport de réduction est égal  
à 528.

Dans notre laboratoire, existe aussi un oscillographe cathodique  
pouvant enregistrer toutes les formes d'ondes de tensions de chocs  
de durées allant de 1 à 5000  $\mu$ s.

L'alimentation de la station s'effectue par le réseau 220V/50 Hz  
et ce à partir d'une prise de courant. Le schéma de principe de  
l'ensemble de l'installation est représenté dans la Figure 3.6.

Le modèle d'essai sur lequel on a effectué notre véri-  
fication est le modèle plat avec lequel on représente les isola-  
teurs de traversées les plus simples. Ce modèle est constitué de  
deux électrodes de dimensions différentes avec une plaque d'iso-  
lant (dans notre cas : plaque de plexiglas,  $\epsilon_r = 4$ ) entre eux.  
La tension à mesurer est appliquée à l'électrode de petites dimen-  
sions (fig. 3.7). Les bornes de terre du générateur de choc et du  
diviseur sont reliées à l'électrode de grandes dimensions (contre  
électrode).

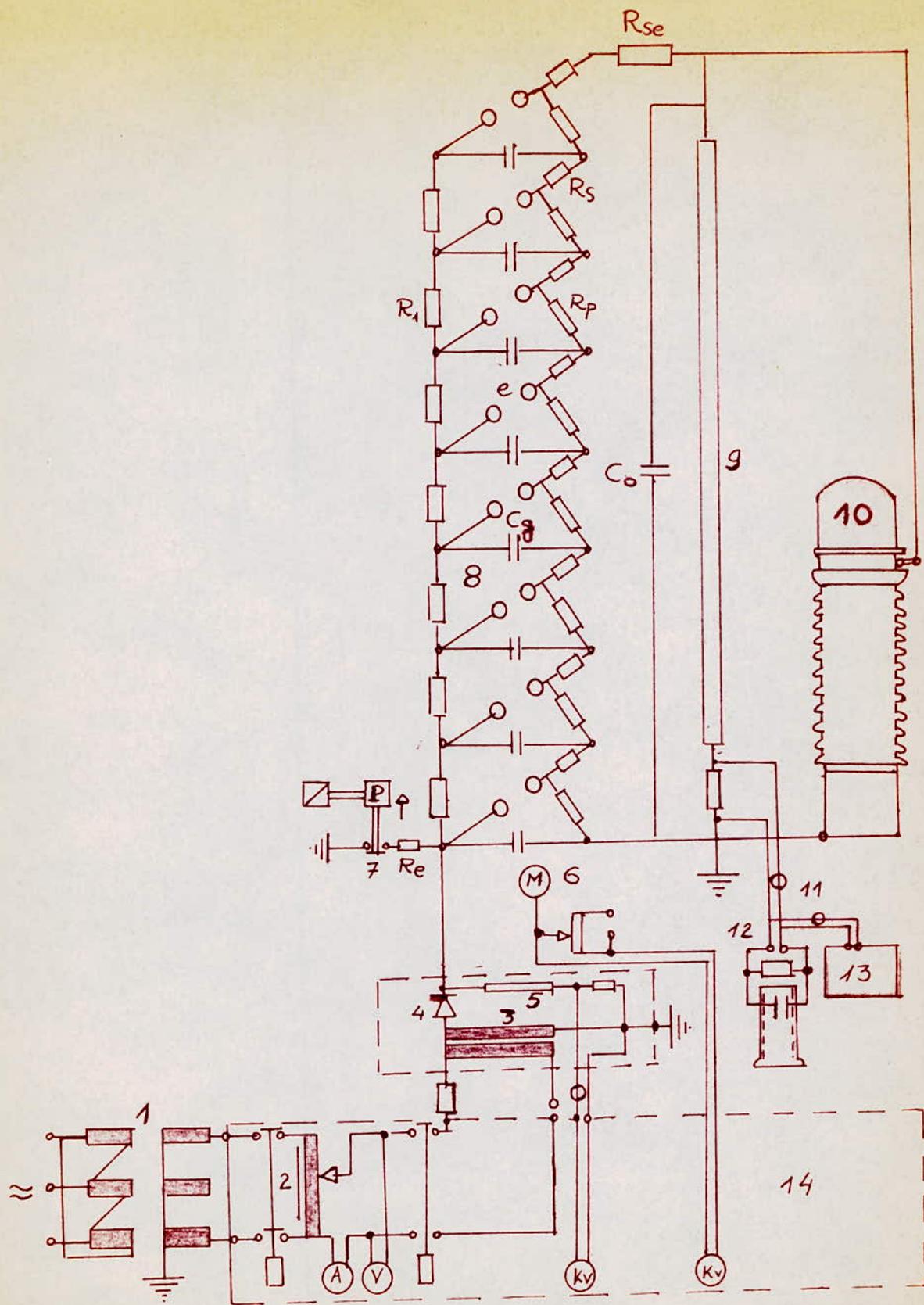


Fig. 3.6.

SCHEMA DE PRINCIPE DE LA STATION  
D'ESSAI DE TENSION DE CHOC DE L'ENPA

- 1 - Transformateur d'Isolation.
- 2 - Transformateur de réglage.
- 3 - Transformateur du redresseur.
- 4 - Goupape redresseuse.
- 5 - Résistance de mesure de la tension de charge.
- 6 - Moteur pour le réglage de l'écartement des éclateurs.
- 7 - Court-circuiteur de mise à la terre.
- 8 - Générateur de choc.

R1 : Résistance de charge.

Re : Résistance de décharge.

Rs : Résistance de front (série).

Rp : Résistance de queue (parallèle).

Rse : Résistance série externe.

Cg : Condensateur de choc.

Co : Condensateur de charge.

e. : **Eclateurs** de couplage (à sphères, position ouverte pendant la charge et fermée pendant la décharge).

- 9 - Diviseur de tension ohmique.
- 10 - Objet d'essai.
- 11 - Câble de liaison coaxial.
- 12 - Oscillographe cathodique.
- 13 - Voltmètre de crête.
- 14 - Pupitre de commande.

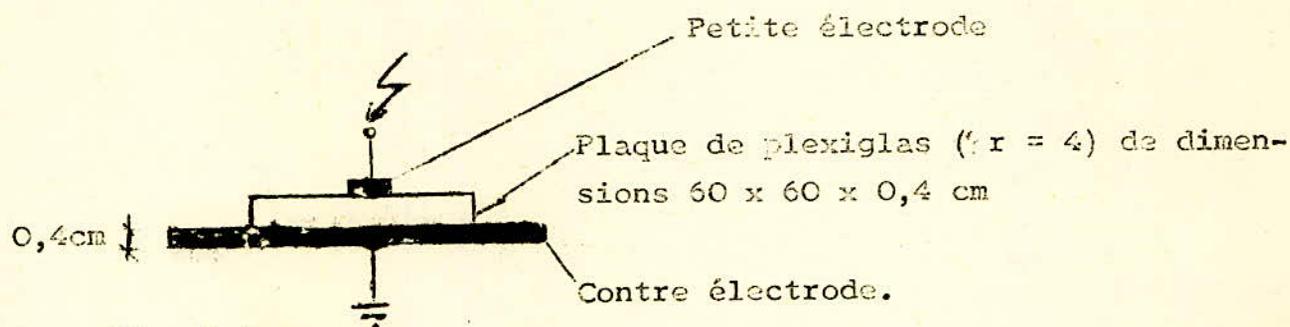


Fig. 3.7.

Ce modèle était donc soumis à une tension de choc dont la forme était  $1,2/50 \mu s$  de la polarité positive et négative. La tension était augmentée jusqu'au contournement. Cette **tension** correspond à la valeur 47731 V pour les chocs positifs et 55968 V pour les chocs négatifs. La vérification théorique de la tension de contournement de ce modèle, nous a permis de constater une concordance logique, ce qui montre que le fonctionnement du voltmètre est parfait.

## CONCLUSIONS

Plusieurs méthodes de mesures de valeurs de crête de tensions variantes par rapport au temps ont été démontrées. Les méthodes les plus utilisées à l'heure actuelle sont celles de l'éclateur à sphères, de l'oscillographe cathodique et du voltmètre de choc.

A l'ENFA, le voltmètre de choc dont la mise en marche a fait l'objet de cette thèse est actuellement en fonctionnement parfait. Ce voltmètre peut mesurer les tensions de crête allant jusqu'à 1600 V et avec une précision de  $\pm 1\%$ .

Connecté au diviseur de tension installé dans notre laboratoire (600.000 V, rapport de réduction 528), ce voltmètre de choc pourra mesurer des tensions situées entre 0 et 600 KV, donc il pourra être utilisé dans le cadre de la station d'essais sous tensions de chocs.

La vérification du fonctionnement du voltmètre était faite sur un modèle plat, représentant les isolateurs de traversée. Cette vérification nous a permis de constater une des possibilités d'utilisation du voltmètre sur le domaine d'application.

Malgré la simplicité de manipulation et sa précision relativement haute, il serait souhaitable d'équiper notre laboratoire avec un éclateur à sphères de paramètres élevés et cela pour des recherches simultanées et des raisons didactiques.

## LITTERATURE

- (1) - Mauduit, A : "Installations électriques à haute et basse tension" Tome I, 4ème Edition, 1964, page 46.
- (2) - Gary, C : "Mesure des impulsions électriques" dans "Techniques générales du laboratoire de physique", de SURUGUE, 2ème Edition, 1956, page 213.
- (3) - CÎRTHA, GH.I : polycopé de cours "Réseaux d'énergie électrique", page 79.
- (4) - Hawley, W-C : "Impulse - Voltage testing", volume 15, 1959.
- (5) - Dobardzic, M : Cours de "Technique de haute tension.
- (6) - Fleury, P. et Mathieu, J-P : "Electrostatique, courants continus, magnétisme", 4ème Edition, 1967, page 483.
- (7) - C.E.I : Publication n°50.
- (8) - Technique de l'Ingénieur : "Mesures et contrôle", Edition n°158, 2ème trimestre 1961.
- (9) - Haefely : l'Equipement du laboratoire à haute tension.
- (10)- Haefely : Le Voltmètre de choc type 64.