

8/83

201

université d'alger

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

UTILISATION DES METHODES
STATISTIQUES POUR LA DETERMINATION DE LA
TENSION DE DECHARGE AUX IMPULSIONS

Proposé par

Mr A BOUBEKEUR

etudié par MM

Kamel CHAID

et

Salim KEMIKEM

Promotion Janvier 83

-0o0- Remerciements -0o0-

Nous tenons à remercier Monsieur
BCUBEKEUR notre promoteur pour les précieux conseils
qu'il nous a protigué.

*** *** ***

Nous tenons à remercier l'ensemble
des professeurs qui ont contribués à notre formation.

INTRODUCTION

On a effectué des recherches pour obtenir les tensions 50% et 2% de décharges disruptives sur une chaîne d'isolateurs en porcelaine à surfaces lisses et propres sous l'action de choc de foudre de paramètres 1,2/5 u.

La difficulté de contrôler ou même de mesurer les facteurs d'influences (conditions atmosphériques, état d'ionisation de l'air, état de surface de l'isolant, etc...) donne aux décharges disruptives un caractère aléatoire dont on doit tenir compte, deux paramètres au moins sont nécessaires pour définir cette variable aléatoire :

une relative à la valeur centrale et l'autre à la dispersion, c'est pour cela qu'il sera toujours difficile de définir un seul nombre les caractéristiques d'amorçage d'un isolement sous une contrainte électrique, donc une tension correspondant à une probabilité définie d'amorçage sera toujours insuffisante sans l'évaluation de la dispersion c'est pourquoi nous indiquerons des tensions de contournement correspondant à une probabilité X % et nous ajouterons une évaluation de la dispersion exprimée par le coefficient de variation c'est à dire l'écart-type rapporté en pourcentage à la valeur moyenne.

Les lois de probabilité suivies par les tensions de contournement d'un isolement sont assimilées à des lois normales ce qui sera vérifié pendant les essais. Il paraît utile d'employer des procédés statistiques pour l'application d'une tension de forme constante répétée plusieurs fois, pour chaque niveau de cette tension on compte la proportion d'application de tension occasionnant des décharges disruptives et pour cela on utilise deux méthodes statistiques ;

- la méthode des paliers multiples :

elle permet de montrer la normalité de la distribution et de déterminer la tension X% de décharges disruptives avec un écart-type s.

- la méthode de Montée-descente :

Elle permet de donner la tension 50% de décharges disruptives avec un écart-type s , avec la méthode de montée et descente élargie on peut avoir la tension $X\%$ de décharges disruptives.

Ces méthodes permettent de déterminer les probabilités en pourcents de décharges disruptives pour un système donné dans les conditions de laboratoire avec un intervalle de confiance de 95 %.

CHAPITRE I. LES DECHARGES DANS L'AIR

L'air ainsi que tous les gaz sont en général de bons isolants électriques à pression atmosphérique 76mm Hg et température ambiante 20°C, l'air assure l'isolement des réseaux aériens, toute fois dans certaines conditions on peut y faire passer un courant de conduction, on dit alors que l'air (ou le gaz) est le siège d'une décharge, les principaux types de décharges sont caractérisés par l'existence de charges libres et d'un champ électrique. Le champ électrique est appliqué au moyen d'électrodes se trouvant à l'intérieure ou à l'extérieure de l'enceinte gazeuse , ce champ peut être continu ou alternatif. Les charges électriques sont produites dans le volume du gaz ou à la surface des électrodes, quand celles-ci se trouvent à l'intérieure de l'enceinte avec un champ, ces charges peuvent se multiplier le courant de décharge augmente en intensité. Dans la pratique la tension disruptive est une grandeur aléatoire définie par une valeur moyenne et un écart-type, elle dépend de la géométrie des électrodes et des formes de tension appliquées. Les phénomènes prédisruptifs en champ non uniforme se manifestent de façon visible et la rigidité dielectrique du gaz est atteinte localement sous forme d'effluves et d'aigrettes avant que la disruption n'intervienne. Avant de traiter les décharges dans l'air il est nécessaire de donner certaines définitions ainsi que l'explication de certaines phénomènes qu'on peut rencontrer pour que le lecteur puisse comprendre l'évolution des décharges dans l'air.

I.1/ Libre parcours moyen (l.p.m.)

Il est intéressant d'étudier la longueur du parcours d'une particule entre 2 chocs successifs, dans ce but on considère que pendant un intervalle de temps " t " la particule parcourt une distance " vt " et pendant le même temps elle subit " Θt " collisions, avec $\Theta = n v \sigma =$ la fréquence des chocs ou la probabilité de chocs par unité de temps

=

particul

unité

v ou

u ou

- $n =$ nombre de particules par unité de volume du gaz
 $\sigma =$ section efficace des collisions
 $v =$ vitesse relative de la particule.

Il en résulte que la distance parcourue librement entre deux chocs successifs :

$$\lambda = \frac{vt}{\theta t} = \frac{v}{\theta} = \frac{v}{nv} = \frac{1}{n\sigma}$$

- Libre parcourt moyen des électrons dans différents gaz dans les conditions normales :

Gaz	Diamètre des molécules en(cm)	l. p. m. en (m)
H ₂	2,8 . 10 ⁻¹⁰	6,5 . 10 ⁻⁷
N ₂	3,8 . 10 ⁻¹⁰	3,5 . 10 ⁻⁷
O ₂	3,6 . 10 ⁻¹⁰	3,9 . 10 ⁻⁷
SF ₆	4 . 10 ⁻¹⁰	3,2 . 10 ⁻⁷

I.2 / Excitation :

Lors qu'un atome ou une molécule a absorbé assez d'énergie pour qu'un de ses électrons passe à un niveau d'énergie supérieur on dit que cet atome ou cette molécule a été excité. Son énergie interne à été accrue de la différence d'énergie $\Delta V = eV$ entre les niveaux finals et initiaux.

a) Excitation par photons

On a la formule de l'excitation : $h\nu + A \longrightarrow A$

Le seuil de la réaction est défini par :

$$h\nu = eV \quad \text{ou} \quad (A) = 12400/V \quad (\text{volts})$$

b) Excitations par les électrons

La formule est : $e^- + A = e^- + A^*$

Si la cible est au repos et l'électron incident animé d'une énergie cinétique E_c , la réaction ne peut se produire que si $E_c \geq e V_i$

c) Excitation par les ions ou atomes



Si la particule cible de masse " m_2 " est au repos et la particule incidente de masse " m_1 " animée d'une énergie cinétique E_c , le seuil de la réaction est :

$$E_s = \frac{m_1 + m_2}{m_2} \cdot e V_i$$

C'est à dire nettement plus élevé que $e V_i^*$

I. 3/ Ionisation :

Lorsqu'un atome ou une molécule a absorbée suffisamment d'énergie pour qu'un de ses électrons s'échappe à l'infini, on dit que cet atome ou cette molécule a été ionisé, son énergie interne est accrue de l'énergie d'ionisation $\Delta V = e V_i$

Le tableau suivant donne le potentiel de la première ionisation c'est à dire la perte de l'électron le moins lié de la dernière couche de quelques atomes et molécules.

Atomes	H	N _e	C	N	O	H _g
V _i (ev)	13,6	24,6	11,3	14,5	13,6	10,4

Molécules	H ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	NO
V _i (ev)	15,6	15,5	12,5	14,4	9,5

Un atome ou une molécule une fois ionisé peut l'être à nouveau une ou plusieurs fois, les potentiels d'ionisation successifs vont en croissant.

a) Ionisation par les photons



c'est l'effet photoélectrique ou la photoionisation elle se produit dès que:

$$h\nu \geq eV_i \quad \text{ou} \quad \lambda (A) \leq 12400 / V_i \quad (\text{volts})$$

Cette condition limite l'effet photoélectrique à la région de l'U. V. ou des rayons X.

b) Ionisation par les électrons



Si la cible est au repos et l'électron incident animé d'une énergie cinétique

$$E_c \text{ la réaction ne peut se produire que si } E_c \geq eV_i$$

c) Ionisation par les ions atomes ou molécules



si la particule cible de masse (m_2) est au repos et la particule incidente de masse (m_1) animée d'une énergie cinétique E_c le seuil de la réaction est:

$$E_s = \frac{m_1 + m_2}{m_2} e V_i$$

Conclusion:

Dans la pratique les électrons sont les plus efficaces parmi les particules ionisantes devant les ions suivis des photons.

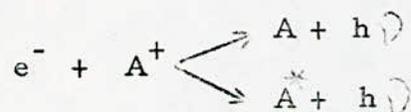
L 4/ Recombinaison

La recombinaison est le phénomène d'attachement des particules lors d'une rencontre entre les ions positifs et les électrons ou entre les ions positifs et négatifs. Pour décrire ce phénomène on utilise la notion de coefficient de recombinaison (α) défini par le taux de décroissance des charges positives (n^+) et négatives (n^-) on a :

$$\frac{dn^+}{dt} = \frac{dn^-}{dt} = -\alpha n^+ n^-$$

1) Recombinaison ion-électron:

a/ Recombinaison radioactive



La première réaction aboutit à la fixation de l'électron sur son niveau fondamental et l'émission d'un photon d'énergie $h\nu$

$$h\nu = E_c - (-E_i) = E_c + E_i$$

E_c = énergie cinétique de l'électron

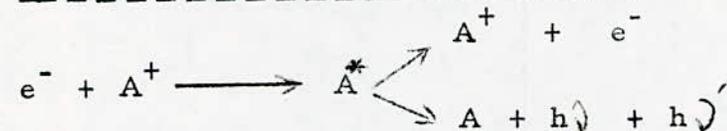
E_i = énergie d'ionisation de la cible

La deuxième réaction donne naissance à une particule excitée au niveau (n)

$$\text{on aura } h\nu = E_c + E_i - E_e$$

avec E_e = énergie d'excitation du niveau (n)

b/ Recombinaison avec double excitation



$h\nu$: énergie du 1er photon

$h\nu'$: énergie du 2eme photon

dans une première étape l'électron incident se fixe sur un état excité de l'atome et l'énergie disponible sert à porter un autre électron du même atome sur un autre niveau excité au bout d'un certain temps un des électrons est éjecté laissant l'ion dans un état initial ou bien encore les deux électrons tombent sur un niveau fondamental en émettant deux photons.

c/ Recombinaison en présence d'une troisième particule



Si un électron rencontre une particule quelconque X au voisinage d'un ion A^{+} il peut lui communiquer son énergie pour pouvoir se recombinaison avec A^{+} . Dans cette réaction l'énergie de recombinaison ($E_c + E_i$) au lieu d'être émise sous forme de photons, elle sert à accélérer la troisième particule X.

d/ Recombinaison dissociative



Cette réaction peut se produire lors d'un choc entre électrons et ions moléculaires, les deux atomes résultants peuvent être excités ou pas. L'énergie de recombinaison est absorbée par la dissociation

Remarque: Les coefficients de recombinaison e^{-} - ion décroissent rapidement quand la vitesse relative des particules augmente c'est à dire quand la température du gaz augmente. Pour l'ensemble des processus on a : $10^{-10} \leq \alpha \leq 10^{-8} \text{ cm}^3 / \text{s}$ pour les températures allant jusqu'à quelques milliers de °K

2/ Recombinaison ion - ion

a/ La recombinaison radiative



b/ La neutralisation mutuelle

On a un échange de charge sans constitution de molécules



c/ La recombinaison à 3 corps

On a les deux premiers phénomènes qui se produisent en basse pression inférieure à 1 mm Hg, la recombinaison radiative ion - ion est très peu probable, α correspondent $\leq 10^{-4}$ cm³/s. par contre la neutralisation mutuelle avec excitation des atomes résultants donne $\alpha \approx 10^{-8}$ cm³/s.

L. 5 / Phénomènes superficiels

On étudie le comportement des surfaces des corps solides au contact des gaz

1) Emission spontanée

a/ Evaporation: C'est l'échange entre le corps solide et l'atmosphère dans laquelle il se trouve d'atomes ou de molécules de la même nature que ceux qui constituent le solide.

b/ Dégazage ou désorption

C'est le phénomène d'émission par les solides d'atomes ou de molécules de nature différentes mais initialement présents dans ces solides.

c/ Emission thermoionique

- émission d'électrons: lorsqu'on chauffe un métal l'énergie cinétique de certains électrons de conduction croit il en est de même pour le nombre des électrons qui parviennent à surmonter la barrière du potentiel et s'éloigner du métal. Le courant du à l'émission augmente avec la température

- émissions des ions : les métaux chauffés peuvent également émettre des ions positifs ou négatifs, mais le travail de sortie est plus élevé de quelques eV que celui des électrons.

2/ Emission secondaire

Lorsque les particules incidentes possèdent suffisamment d'énergie elle peuvent arracher à la paroi métallique des atomes ou des molécules.

a/ Action des électrons

Lorsqu'un faisceau monocinétique d'électron rencontre une paroi solide celle-ci émet à son tour des électrons dont certains sont des électrons primaires réfléchis sans perte de vitesse. La paroi émet pour chaque électron incident un certain nombre d'électrons secondaires qui ont pour la plus part une énergie de 10 eV. Le coefficient ou le pouvoir d'émission secondaire (δ) est défini comme étant le rapport du nombre total d'électrons quittant la paroi sur le nombre total d'électrons incidents

- Tableau : coefficient maximum secondaire de quelques métaux :

Métal	A_g	Al	Au	Cd	Cu	Fe	MO	Ni	Pt	W
δ_{max}	1,5	1	1,5	1,1	1,3	1,3	1,25	1,3	1,8	1,4
E (eV)	800	300	750	400	600	350	375	550	800	700

δ dépend de la nature de l'état des surfaces bombardées et aussi des impuretés présentes en surface, δ est plus élevé pour les surfaces lisses. L'émission secondaire dépend de l'angle d'incidence des électrons.

b) actions des ions

Les ions peuvent provoquer l'émission d'électrons secondaires sur les surfaces qu'ils bombardent mais le seuil d'énergie est doublé par rapport à celui des électrons, car l'ion arrache deux électrons l'un est libre et l'autre sert à neutraliser l'ion. donc l'énergie disponible pour réaliser ce phénomène est égale à l'énergie cinétique des ions plus l'énergie d'ionisation de l'ion incident.

c) actions des atomes neutres

Ceux-ci ne disposent que de leur énergie cinétique qui doit atteindre le $K e V$ avant que l'émission secondaire soit notable.

d) actions des photons

Ce phénomène est caractérisé par un seuil de longueur d'onde ou de fréquence

$$h \nu_s = e \phi = \text{travail de sortie de la paroi}$$
$$\lambda_s (\text{\AA}) \cdot \phi = 12400$$

ν = fréquence de l'onde électromagnétique incidente

λ = sa longueur d'onde.

La longueur d'onde critique λ_s tombe en général dans l'ultra-violet

I. 6/ Mobilité

Au sein d'un gaz traversé par un champ électrique uniforme les ions lourds acquièrent une vitesse moyenne constante. Les collisions avec les molécules environnantes jouent un rôle important dans l'établissement d'une vitesse constante. Cette vitesse d'entraînement ou de diffusion (v) dans le cas des ions de charge (e) soumis à un champ électrique E est égale à :

$$v = \mu E \quad \text{avec} \quad \mu = \text{mobilité des ions.}$$

a/ cas des ions lourds :

considérons un gaz neutre contenant des ions lourds de charge

(e) et de masse (m) dans un champ uniforme .

on a des collisions élastiques entre les ions et les molécules neutres , les échanges d'énergie sont importants mais

mais ne modifient pas la distribution des vitesses des particules

quiest égale à : $V = \text{cte} \cdot \frac{E}{P}$ pour une température

donnée avec (P) la pression du gaz .

b/ cas des électrons :

La différence énorme entre les masses des électrons et des ions

entraîne une différence dans leur comportement dans un même

gaz ambiant . au cours d'une collision élastique avec une

Molécule neutre un électron perd beaucoup moins d'énergie qu'un

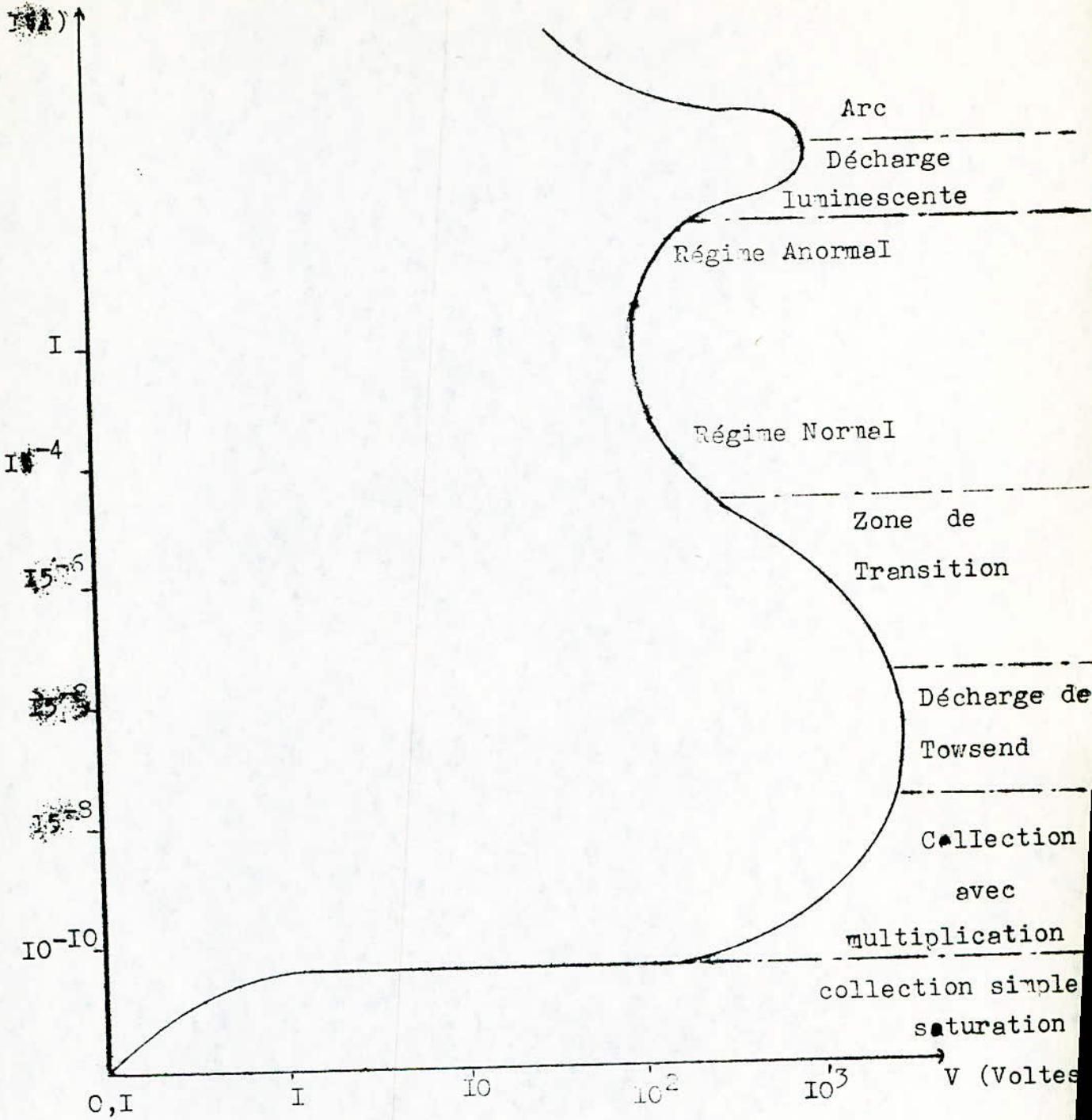
ionnet la vitesse moyenne d'entraînement est donnée par:

$$V = \text{cte} \cdot \frac{E}{P} .$$

P particules	Mobilité $\text{cm}^2 / \text{V.s}$
e^-	2000
ions (+) petits	1,37
ions (-) petits	1,91
ions lourds	10^{-5}

I. - 7/ Décharges Electriques dans les gaz :

La fig-I- représente l'allure générale des caractéristiques des décharges électriques pour des pressions comprises entre 0,1 et 10 mm.Hg .



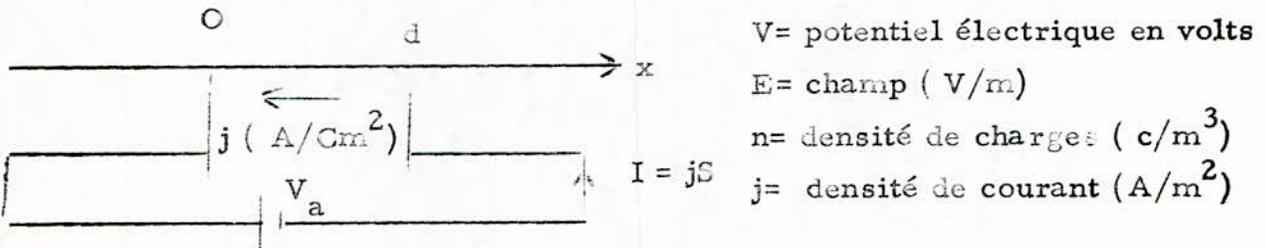
(Fig I)

Caractéristique schématique d'une décharge gazeuse

On a deux types de décharges : les décharges non autonomes qui s'interrompent dès que cesse d'agir l'agent ionisant extérieur par opposition aux décharges autonomes dont la multiplication de décharges est telle qu'elle rend inutile l'intervention d'un facteur extérieur.

2) Production de charges dans le volume du gaz

On ionise l'espace compris entre 2 électrodes en l'échauffant au moyen d'une flamme ou en l'irradiant avec des rayons X ou U.V. soit (ν) le Nbre de paires d'ions formées par unité de volume et de temps dans les gaz considérés. On suppose que les électrodes sont planes, parallèles distante de (d) et baignent entièrement dans le gaz.



Admettons que chaque paire d'ions est composée d'un électron négatif et d'un ion positif lourd. Si l'on fait croître (V_a) progressivement (j) croît d'abord linéairement avec (V_a) puis tend vers une valeur de saturation (j_s) et pour (V_a) assez grand j_s recommence à croître plus rapidement se sont les parties A, B et C de la courbe (fig.1). Nous allons étudier successivement ces trois parties.

- $V_a = 0$: aucun champ électrique n'est appliqué, les ions formés diffusent lentement et disparaissent par recombinaison. (agitation thermique)
- $V_a =$ faible (collection sans multiplication) : en tout point il existe un champ $E = \frac{V_a}{d}$ qui entraîne les ions de chaque espèce vers l'électrode de signe contraire avec une vitesse déterminée par leur mobilité. Le gaz est siège d'une densité totale de courant :

$$j = ne (v_+ + v_-) = ne (\mu_+ \mu_-) E$$

ainsi j est bien proportionnel au champ électrique ou à la D. D. P. (fig. (1) Région A).

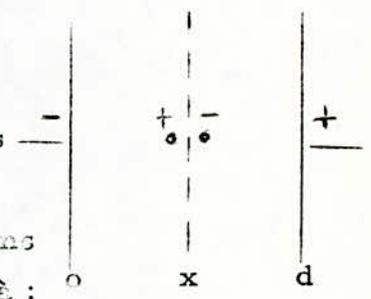
Au fur et à mesure que V_a croît j croît aussi mais de moins en moins (région B Fig. 1) il tend vers sa valeur de saturation qui est déterminée par (γ) et (d) et non pas par (V_a) car la vitesse acquise par les ions des deux signes est telle que les recombinaisons deviennent de plus en plus rares et l'on tend vers une situation où tous les ions d'un même type sont captés par l'électrode de signe contraire au fur et à mesure qu'ils sont créés donc le courant total ne pourra plus augmenter.

- V_a grand : (multiplication des charges)

L'augmentation de la densité de courant au delà de sa valeur de saturation (partie C Fig. 1) est due à un autre phénomène qui est l'ionisation du gaz par les électrons primaires. En effet lorsque V_a est supérieure ou égal au potentiel d'ionisation V_i du gaz, les électrons produits par l'agent ionisant extérieur peuvent obtenir dans le champ électrique une énergie suffisante pour ioniser à leur tour les molécules du gaz et on peut faire le même raisonnement pour les électrons qui en résultent et ainsi de suite, ce processus d'avalanche entraîne un accroissement rapide du courant total. En pratique, on définit le coefficient (α) appelé premier coefficient de Townsend et qui représente le nombre moyen de paires d'ions formées par un électron sur un parcours de 1 cm.

- Considérons une tranche de gaz d'épaisseur dx de surface unité et d'abscisse x , il en sort $N_0 = \gamma \cdot dx$ électrons primaires par unité de temps, quand ils arrivent au point d'abscisse $y > x$, ces électrons sont accompagnés de tous les électrons qui se sont formés par avalanches entre x et y . Soit N le nombre total d'électrons en y entre y et $y + dy$ ils donnent naissance à :

$dN = N\alpha dy$ électrons donc $\frac{dN}{N} = \alpha dy$ d'où $N = e^{\alpha y}$



2) Décharge de Townsend

Ces décharges sont autonomes c'est à dire qu'elles survivent quand l'agent ionisant qui leur a donné naissance disparaît. La nature et les conditions d'établissement d'une décharge autonome dépendent beaucoup de la pression du gaz.

a/ Multiplication des charges avec effet secondaire et claquage

Pour le même montage d'électrodes planes et parallèles, on a vu que pour une tension assez élevée la densité de courant dépasse une valeur de saturation toute en lui restant proportionnelle et si la tension appliquée aux électrodes croît encore le coefficient de proportionnalité croît encore et très vite. Ce phénomène est dû à de nouveaux processus:

les électrons arrivant sur l'anode provoquent une émission secondaire d'ions positifs qui contribuent au courant électrique, d'autre part l'apparition d'un électron par ionisation du gaz s'accompagne de la naissance d'un ion positif et pendant son déplacement vers la cathode il peut provoquer de nouvelles ionisations dans le gaz c'est l'effet (β) le même ion arrivant sur la cathode avec une énergie suffisante peut arracher un électron secondaire c'est l'effet (γ), le photon émis lors de recombinaisons ion-électron et les atomes portés à un niveau métastable à la suite d'un choc peuvent extraire des électrons secondaires de la cathode (effet δ et ξ). On a vu que pour chaque électron quittant la cathode il arrive $e^{\alpha d}$ électrons sur l'anode donc chaque électron donne naissance à $(e^{\alpha d} - 1)$ paires d'ions sur son parcours. Les $(e^{\alpha d} - 1)$ ions arrivent sur la cathode et en extrait $\gamma (e^{\alpha d} - 1)$ électrons secondaires ($\gamma = 2^{\text{eme}}$ coefficient de Townsend), tous les électrons de la 2^{eme} génération subissent le même sort que l'électron initial et ainsi de suite. Donc à cet électron initial unique correspond sur l'anode un flux de

$$e^{\alpha d} + \gamma(e^{\alpha d} - 1)e^{\alpha d} + \gamma^2(e^{\alpha d} - 1)^2 + \dots = e^{\alpha d} [1 + \gamma(e^{\alpha d} - 1) + \gamma^2(e^{\alpha d} - 1)^2 + \dots] = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} = m$$

Si l'ionisation se fait dans le volume du gaz et non sur la cathode le coefficient de multiplication dépend de l'abscisse du point d'apparition de l'électron initial. On a (m) infini pour $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ c'est le critère de Townsend

- Physiquement cela signifie que : une seule ionisation due à une cause extérieure peut en engendrer un courant très intense limité que par la résistance interne de la source de tension et par son débit maximum qui entraîne la décharge

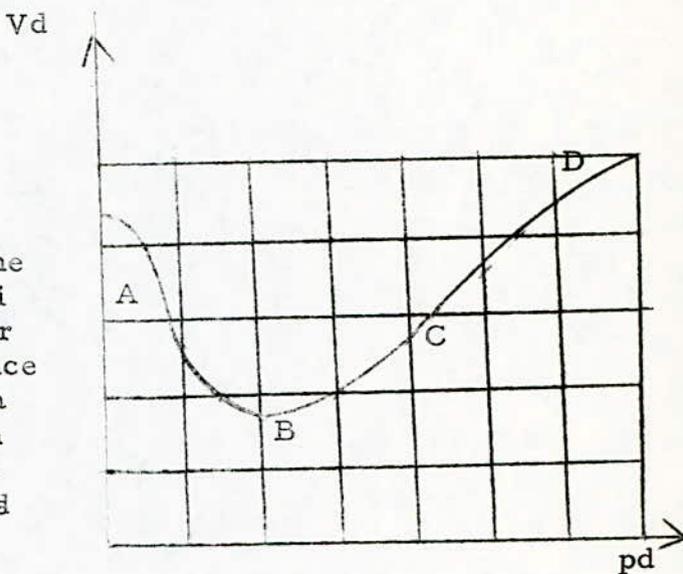
b) Loi de Paschen

La loi $V_d = f(pd)$ est représentée sur la figure (2)^d, elle est valable d'une manière rigoureuse entre les points A et C, à gauche du point A c'est l'isolement par le vide qui correspond approximativement à une valeur de (pd) tel que le (l.p.m.) à la distance entre électrodes. Du point A au point B la tension disruptive décroît rapidement et en B elle passe par un minimum très plat qui correspond pour tous les gaz à des valeurs telles que :

$$10^{-1} < pd < 10 \text{ mbar-cm}$$

$$100 < V_d < 500 \text{ V}$$

de B à C la tension disruptive est croissante avec (pd). La présence du minimum est expliquée par le fait que, à gauche du minimum les (l.p.m.) sont grands (basses pressions) par rapport à (d) donc il se produit peu de chocs d'où une faible ionisation du gaz. A droite du minimum les (l.p.m.) sont petits (hautes pressions) et les électrons auront du mal à acquérir entre deux chocs l'énergie nécessaire pour ioniser le gaz. Entre ces 2 cas extrêmes V_d passe par un minimum. Du point C au point D la loi de Paschen n'est plus observée car la tension disruptive V_d n'est plus fonction du seul produit (pd)



mais fonction séparément de p et de d .

- Remarques:

1) Si les électrodes ne sont pas planes le champ électrique n'est plus uniforme et selon que le champ est renforcé ou atténué au voisinage de la cathode le facteur de multiplication s'accroît ou diminue et la tension de claquage diminue ou augmente

2) La décharge de Townsend est peu lumineuse et elle transporte un courant peu intense c'est pour cela qu'on l'appelle décharge sombre.

1.8/ Rigidité diélectrique des gaz

Chaque corps a une résistance plus ou moins variable au passage d'un courant électrique. Ceux dont la résistance est élevée sont appelés isolants ou diélectriques. Ces corps n'ont pas une rigidité diélectrique infinie, ils sont traversés par un courant très intense sous forme d'une étincelle ou d'un arc dès que le champ électrique atteint une valeur suffisante.

On appelle tension de claquage la D.D.P. des 2 électrodes qui servent à établir le champ électrique, cette D.D.P. est mesurée immédiatement avant le percage du diélectrique.

Domaine de validité du critère de Townsend :

Dans ce qui a précédé nous avons obtenu la condition de claquage de Townsend en tenant compte du seul effet γ , on généralise ce résultat en tenant compte des effets δ et ϵ . La condition de claquage s'écrit alors :

$$c \left(\frac{\alpha d}{e} - 1 \right) = 1$$

avec $c = \delta + \frac{\epsilon}{\gamma} = 2^{\text{eme}} \text{ coefficient de Townsend.}$

L'expérience montre que cette généralisation permet au critère de Townsend de rester valable pour des champs uniformes depuis

$pd = 10^{-2}$ à 10^{-1} Cm.mm Hg jusqu'à $pd = 100$ Cm.mm Hg.

Ainsi Llewellyn-Jones et ses collaborateurs ont montré que dans un intervalle $10^{-2} < pd < 10^3$ mm Hg.Cm. Le mécanisme de Townsend suffit à expliquer des temps de formation de la décharge de l'ordre de 10^{-6} s pour des surtensions de quelques % de la plus petite tension de claquage.

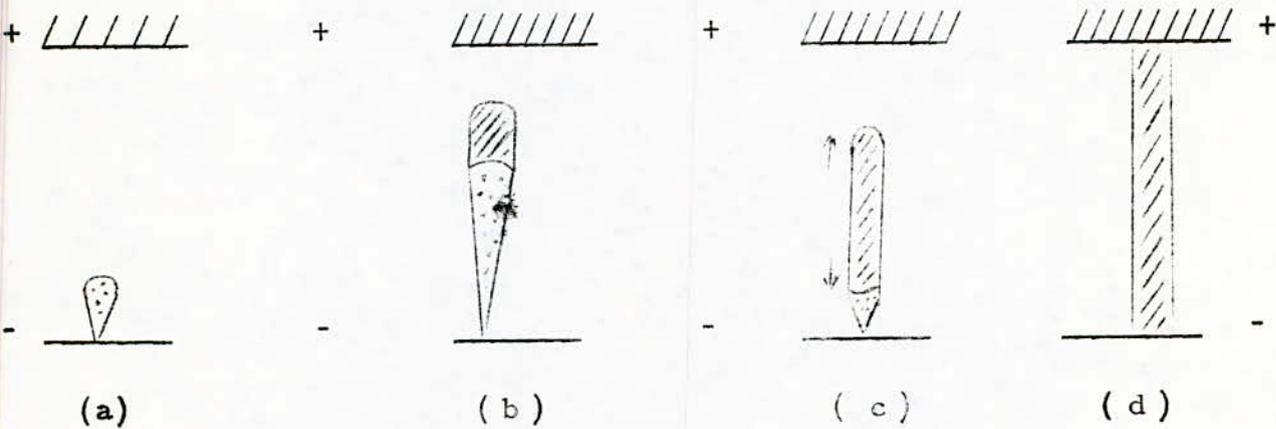
Mais l'expérience montre que pour des surtensions V très grandes t ce temps peut être ramené à des valeurs extrêmement faibles et même inférieures au temps de transit d'une avalanche ($0,6 \cdot 10^{-9}$ s pour $d = 1$ mm). Donc le critère de Townsend ne peut expliquer ce phénomène, d'autres processus interviennent.

1) Formation des canaux

Donc l'évolution d'une décharge sous l'effet d'une forte surtension permet d'entrevoir de nouveaux mécanismes de claquage. C'est ainsi que Raither, Loeb et Meek on été amenés à proposer leur mécanisme de canaux et de Streamers. Leurs théories sont fondées sur les observations suivantes :

- a/ Expérimentalement la tension de claquage dans l'air à quelques atmosphère ne varie pas beaucoup avec la nature de la cathode
- b/ Le courant de décharge pour des surtensions importantes atteint des valeurs assez grandes avant la fin de la 1ere avalanche
- c/ La décharge n'est plus diffusée comme celle de Townsend mais concentrée en canal avec des ramifications et des changement brusques de direction
- d/ Sur le trajet de ce canal la densité de charge doit perturber le champ électrique initial

- Processus de la formation d'un canal :



- (a) : début d'avalanche due à un électron
- (b) : formation d'un plasma conducteur en tête d'avalanche se dirigeant vers l'anode
- (c) : le canal de plasma commence à se diriger vers la cathode
- (d) : canal établi entre anode et cathode

En (b) la charge d'espace des ions positifs soustrait à l'avalanche un nombre d'électrons suffisant pour la neutraliser localement d'où la formation d'une traînée de plasma derrière l'avalanche. D'après Meek la traînée commence à se former lorsque le champ de charge d'espace est à peu près égal au champ initial. Pour Raether il faut que le nombre des charges dans l'avalanche atteigne $N_c = 10^8$ à 10^{10} , l'extrémité arrière de cette traînée perturbe le champ électrique et attire fortement les électrons libérés par la photoionisation du gaz, il se forme ainsi de nouvelles avalanches qui prolongent rapidement le canal de plasma vers la cathode (c). Le même processus a lieu du côté anodique et dès que le canal de plasma est complété la décharge est établie (d).

Remarques

- 1) Ce processus ne se rencontre pas dans les gaz purs, rares ou atomiques probablement à cause de l'absence de la photo-ionisation du gaz.
- 2) Il n'est possible que pour une distance interélectrodes permettant à la densité de charge dans l'avalanche d'atteindre la valeur critique N_c

2/ Claquage dans les champs non uniformes

Dans la pratique le champ électrique entre deux électrodes n'est jamais uniforme, des résultats expérimentaux sont établis :

- 1) ils diffèrent suivant la polarité de la tension appliquée
- 2) ils dépendent de l'électrode qui a le plus petit rayon de courbure car c'est à son voisinage que le champ est le plus élevé

Exp. : Géométrie coaxiales et bifilaires des électrodes

Soit un fil mince et lisse de rayon (r) tendu dans l'axe d'un cylindre (c) de rayon (R) tous deux assez longs, le cylindre est rempli d'un gaz à la pression (p) lorsque la tension V atteint la valeur V_c de la tension de claquage, on voit apparaître une gaine lumineuse autour du fil et en même temps on entend un bruissement, dans l'air on peut constater la formation d'ozone; c'est l'effet couronne. Dans le cas où le fil est porté au potentiel positif par rapport au cylindre il s'entoure d'une gaine lumineuse de couleur blanche lenté dans l'air et si le fil est porté au potentiel négatif par rapport au cylindre il se parsème d'aigrettes rougeâtres et courtes, régulièrement espacées. Si la tension V est alternative on observe les phénomènes cités alternativement toutes les demi-périodes. Si la tension est continue on observe une nette différence entre les tensions de claquage pour le fil mis au potentiel positif puis au potentiel négatif.

3/ Analyse du phénomène de la couronne

On a admis que le critère d'apparition de l'effet couronne est de la même forme que celui de Townsend, comme α augmente avec le champ l'ionisation sera importante au voisinage immédiat du fil, donc c'est cette région qui détermine les conditions du claquage. Lorsque le fil est négatif cette région est le siège d'avalanches électroniques on a l'effet (γ) qui est renforcé les autres effets sont diminués à cause de la faible surface de la cathode, d'où la région voisine du fil possède une forte densité de charge d'espace positif qui annule le champ au voisinage du fil, donc dans cette région les électrons ne peuvent plus ioniser le gaz, ils s'attachent à des neutres et se dirigent vers l'anode, ce sont eux qui transportent le courant électrique une fois la décharge établie.

Lorsque le fil est positif, il attire les électrons qui peuvent ioniser le gaz une fois qu'ils ont acquis une énergie suffisante c'est à dire au voisinage du fil, dans ce cas les processus secondaires qui entretiennent la décharge sont les effets β , δ et γ , car les ions positifs sont attirés par la cathode cylindrique et ils arrivent sur celle-ci avec une vitesse assez faible pour provoquer une émission secondaire notable, là aussi après la décharge le courant est principalement constitué par des ions positifs.

Conclusion

On a vu que pour avoir un claquage dans l'air il faut avoir entre les électrodes une charge électrique initiale libre qui traverse l'espace inter-électrodes grâce à l'établissement d'un champ électrique sur son trajet la charge donne naissance à une avalanche d'électron secondaire des ions positifs et des photons. Ce phénomène de multiplication est régi par le 1er coefficient de Townsend (α) il y aura claquage que si chaque avalanche crée au moins une autre avalanche aussi dense et ainsi de suite cela se fait grâce à un autre processus de production de charge libre, ces processus sont:

- processus β : ionisation du gaz par les ions positifs créés par l'électron initial
- processus δ : émission d'électrons secondaires par la cathode sous l'impact des ions de la décharge
- processus δ : émission d'électrons secondaires par la cathode sous l'impact des photons issus de la décharge
- processus ϵ : émission d'électrons secondaires par la cathode sous l'impact d'atomes excités
- processus γ : photo-ionisation du gaz

I.9/ Rigidité diélectrique de l'air aux tensions de chocs

1) Les surtensions apparaissant dans les systèmes électro-énergétique ayant pour cause principale les décharges de foudre (atmosphérique) nous oblige à connaître la rigidité des différents systèmes. d'isolation parmi lesquelles les systèmes ayant pour diélectrique l'air, aux impulsions de tensions de courte durée et rapidement variables, les impulsions de tension apparaissant après les coups de foudres sont caractérisés par une rapide augmentation de tension dans un temps de l'ordre de la micro-seconde et disparaissant après quelques dizaines de micro-secondes pour cela on appelle de telles impulsions des chocs de tensions, la forme de la tension de choc est définie par :

- la durée du front (T_1)

La durée conventionnelle du front T_1 est définie comme étant 1,67 fois l'intervalle de temps (T) compris entre les instants : où la tension est égale à 30% et 90% de la valeur de crête.

- origine conventionnelle a_1 d'une tension de choc :

Par définition l'origine conventionnelle d'une tension de choc et l'instant qui précède d'une durée de $0,3 T_1$ l'instant qui correspond au point A. fig. 1.

- durée jusqu'à mi-valeur de crête T_2

La durée jusqu'à mi-valeur de crête d'une tension de choc est l'intervalle de temps compris entre l'origine conventionnelle et l'instant correspondant au point de la moitié de la valeur de crête sur la queue de l'onde.

- tension de choc normale

C'est une tension de choc pleine, ayant une durée conventionnelle de front de 1,2 micro-secondes, et une durée conventionnelle jusqu'à mi-valeur de crête de 50 micro-secondes, c'est à dire tension de choc $1,2 \mu s / 50 \mu s$

Si une tension de telle forme a une valeur de crête suffisamment grande et est appliquée à un système d'isolation elle pourrait conduire à une décharge disruptive . La décharge disruptive peut avoir lieu sur le front ou sur la queue du choc, le temps compte à partir du commencement de choc, jusqu'au moment où l'on a la décharge disruptive s'appelle le temps à la décharge (à l'amorçage), le temps à l'amorçage (t_a) se compose de deux temps:

1- t_s : temps statique à l'amorçage : c'est le temps après lequel la tension de choc atteint une valeur à laquelle on aurait eu un amorçage à tension faiblement variable (Exp:tension 50Hz)

2- t_r : retard à l'amorçage: la valeur de (t_r) est influencée principalement par un temps statistique de retard lié à l'apparition dans l'intervalle de décharge d'un électron précurseur de la décharge. Le retard statistique dépend de la valeur du niveau de surtension c'est à dire du rapport entre la tension appliquée et la tension de décharge disruptive statique, ce rapport décroît avec l'augmentation de la surtension, dans le système à champ uniforme il décroît jusqu'à une certaine limite par contre dans le système à champ non uniforme il décroît sans atteindre une telle limite, dans le cas du système plan (champ uniforme) ainsi que dans les systèmes à champ presque uniforme, ce temps peut être diminué par irradiation de l'intervalle entre électrodes par des rayonnements ayant une énergie suffisamment grande.

- La 2eme composante du temps de retard et le temps nécessaire à la formation de la décharge, ce temps est compte à partir du moment de l'apparition d'un électron effectif (libre) dans l'intervalle interelectrodes jusqu'au moment où cet intervalle est court circuité par un canal de plasma à forte conductivité

- Le temps de développement de la décharge se compose de 2 temps :

1) le temps de formation (développement) d'une avalanche jusqu'au moment où commence l'apparition du canal de plasma

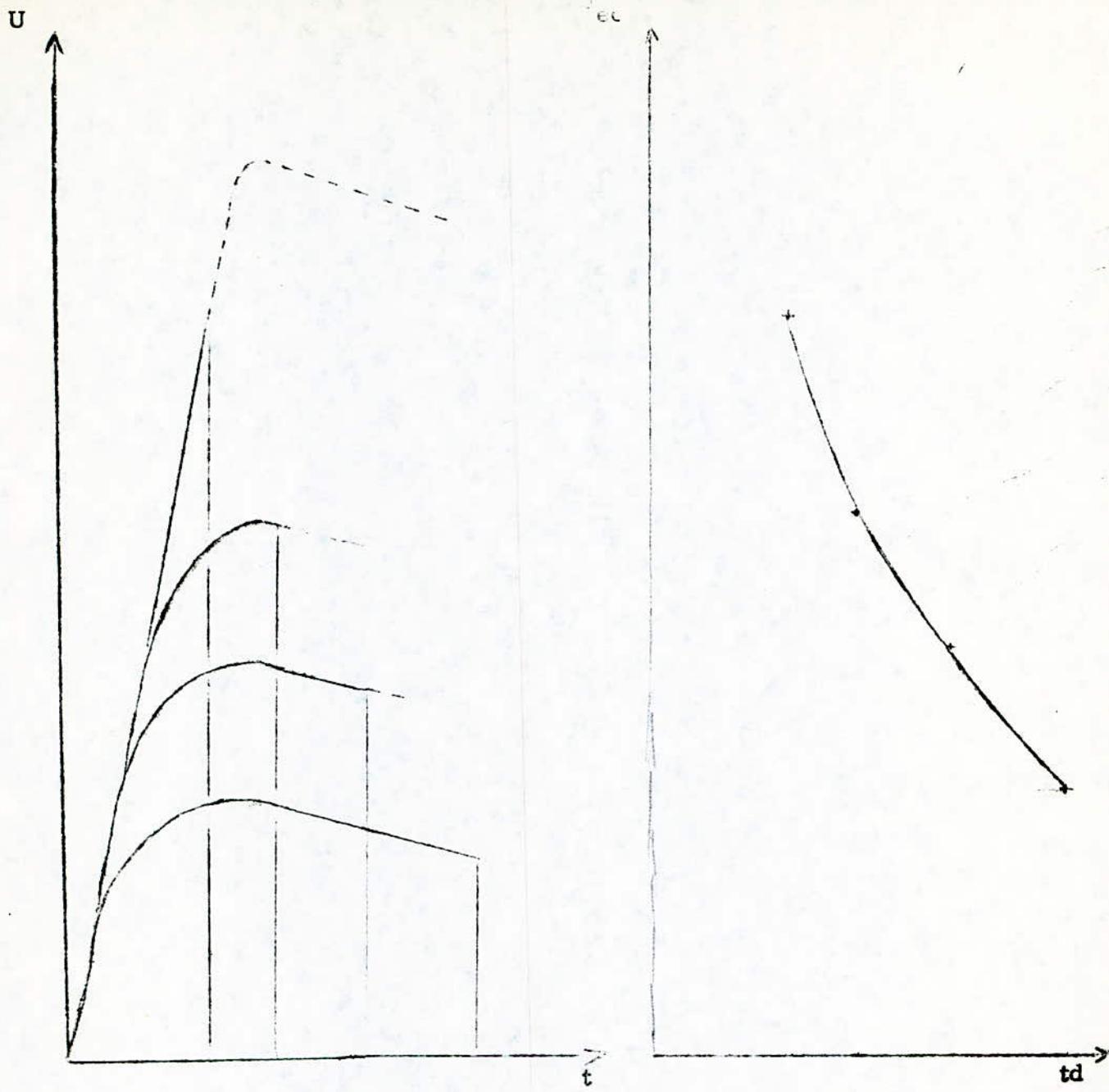
2) le temps de développement du canal de plasma. L'augmentation de la surtension a pour influence la diminution de ces deux temps.

- La rigidité diélectrique de l'air aux impulsions :

Dans différents systèmes elle est définie à l'aide de ce qu'on appelle la caractéristique de choc - Fig. 2. - c'est à dire la relation entre la plus grande valeur de tension qui a été appliquée à l'objet avant l'amorçage et le temps jusqu'à l'amorçage.

Si l'amorçage a lieu sur le front du choc le point de la caractéristique sera le point du choc auquel a eu lieu l'amorçage, si par contre, l'amorçage a eu lieu sur la queue du choc, les coordonnées du point de la caractéristique de choc correspondants sont la valeur de crête du choc et le temps à l'amorçage. La tension de décharge disruptive et le temps à l'amorçage constituent des lois statistiques. Comme cause de ce phénomène on peut indiquer le temps statistique de retard lié à l'apparition du premier électron effectif dans l'intervalle de décharge.

A chaque niveau de tension de la caractéristique correspond une probabilité de décharge, cette probabilité peut varier de zéro à 100% . Les valeurs de tension 50% et 100% peuvent être définies par la caractéristique de probabilité de décharge en fonction des valeurs de crêtes de tension de choc de même forme et de même polarité appliqués au système d'isolation comme nous le verrons dans les chapitres suivants.



Caractéristique de choc (de conournement)

(fig. 2)

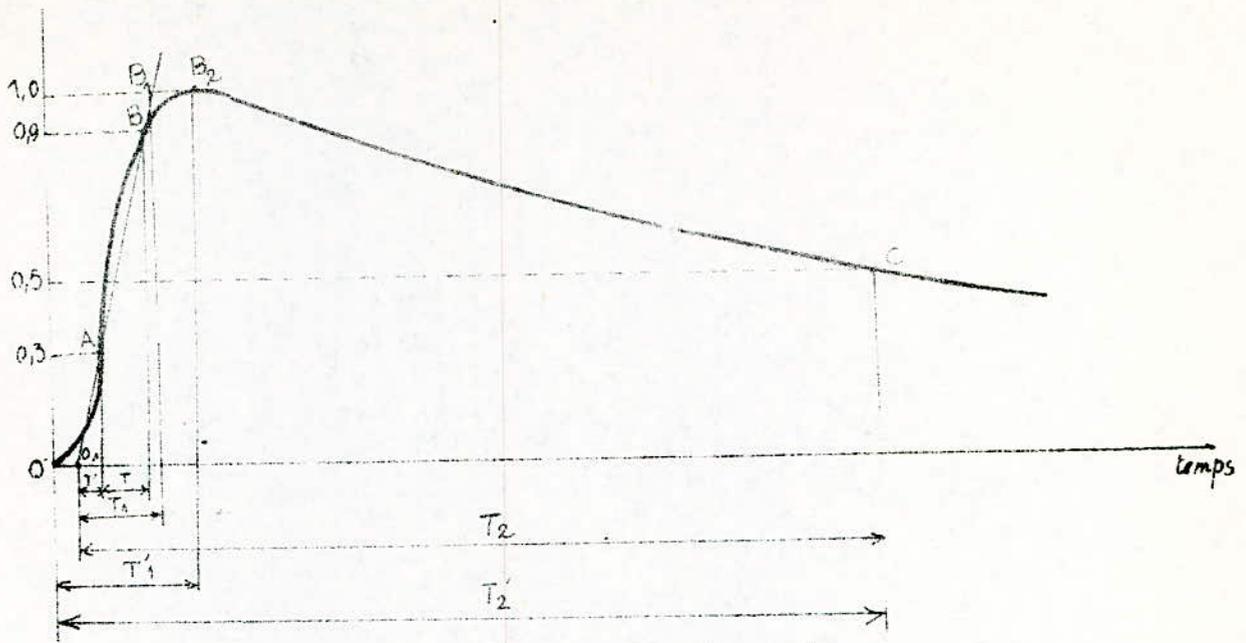
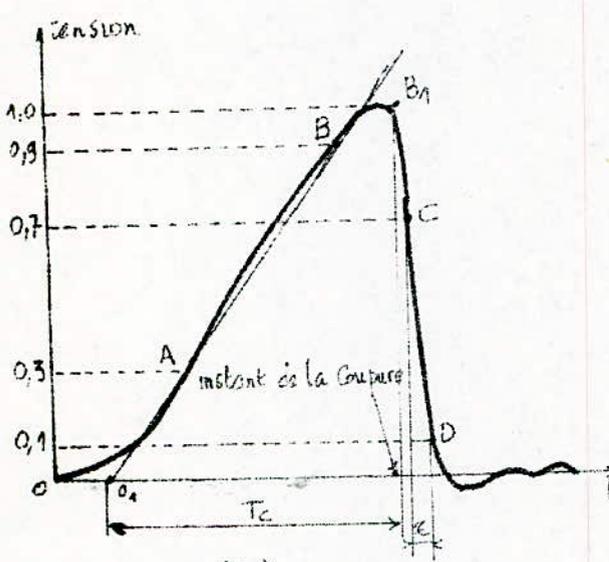


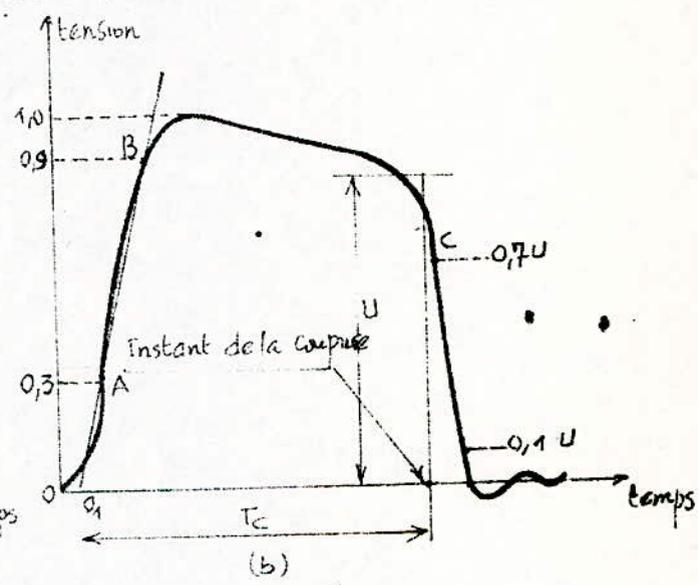
fig. 1. Onde de tension de choc pleine

$T_1 = 1,67 T_1'$ $T_2' = 0,3 T_2 = 0,5 T_2$

T_1 = durée conventionnelle du front ; T_2 = durée conventionnelle jusqu'à mi-valeur de crête
 o_1 = origine de la tension de choc ; o_2 = origine conventionnelle de la tension de choc ;
 T_1' = durée réelle du front ; T_2' = durée réelle jusqu'à mi-valeur ; o_1, o_2 = front conventionnel
 OB = front réel ; β = raideur conventionnelle



(a)



(b)

Tensions de choc coupées

a) sur le front

$T_{fc} = 1,67 T_c$
 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) sur la queue

U = valeur estimée de la tension à l'instant de la coupure ; C = moment conventionnel de la coupure.

CHAPITRE II . STATIONS D'ESSAIS DE TENSION DE CHOC

Dans toutes les installations d'essais de tension de choc on doit avoir les parties principales suivantes :

- a) Dispositifs d'alimentation et de charge du générateur de choc
- b) Equipement de commande et mise à la terre du générateur de choc et générateur lui-même
- c) Equipement de mesure et enregistrement
- d) Pupitre de commande
- e) Objet d'essai

2.1 Description des différents équipements constituant la station d'essai de tension de choc

2.1.1 L'appareillage d'alimentation des installations de choc comprend essentiellement un groupe de charge à tension réglable et polarité facilement commutable. Les solutions modernes sont les redresseurs aux silicium formant avec le transformateur élévateur à H. T. une unité compacte. La puissance nécessaire pour l'alimentation du transformateur élévateur est généralement faible et le groupe de charge peut être connecté par l'intermédiaire d'un transformateur de réglage au réseau à basse tension.

L'équipement de charge du générateur de choc est la suivante :

- transformateur d'isolement
- transformateur de réglage
- transformateur de redresseur
- redresseur
- résistance de mesure de tension de charge

2.1.2 L'équipement de commande et de mise à la terre du générateur de choc:

- Dispositifs d'amorçage du générateur avec à titre d'exemple: bloc d'allumage, condensateur de couplage et sphères d'amorçage pour le déclenchement électronique
- Moteur pour le réglage de l'écartement des éclateurs
- Court-circuiteur de mise à terre avec ressort de fermeture en cas de manque de tension

Le générateur de choc comporte les éléments suivants :

- Résistance de décharge
- Résistance de front (série)
- Résistance de queue (parallèle)
- Condensateur de choc
- Résistance de charge
- Eclateurs de couplage à écartement variable

2.1.3 Equipement de mesure et d'enregistrement :

- Réducteur de tension (diviseur de tension)
- Spintermètre avec son moteur pour le réglage de l'écartement, bloc d'allumage et électrode de coupure
- Oscillographe à rayons cathodiques

2.

2.1.4 Le pupitre de commande: qui comporte tous les appareils de mesures et de commande

On peut dire qu'il peut porter en général l'appareillage suivant :

- Transformateur de réglage de tension de charge avec son régulateur automatique ou manuelle
- Amperemètre et voltmètre pour la mesure directe de courant et de tension de charge

- Dispositif d'isolement du transformateur de réglage du côté primaire et du côté secondaire, commandé électriquement
- Un voltmètre pour l'indication indirecte de la tension correspondante à l'écartement des aères de couplage du générateur avec double échelle: " Kilovots " et " millimètres"
- Un voltmètre avec l'échelle en KV pour la mesure indirecte
- Un appareil de mesure de l'écartement du spintermètre avec échelles en " millimètre "
- Les prises de courant pour l'alimentation des circuits de signalisation (lampes rouges), verrouillage électrique des axes d'entrées au plateau avec circuit de commande principal; l'utilisation éventuelle de tension au primaire du transformateur de réglage
- Autres appareils de commande, signalisation et raccordement

2.1.5 Objet d'essai : sont tous les équipements prévus pour les installations électriques haute tension comme :

- Isolateurs (de lignes, supports, bornes de traversée)
- Transformateurs (de puissance, de courant, de tension)
- Câbles (en principe par 10^m de longueur)
- Appareils de commande (sectionneurs, disjoncteurs) etc...
- Bornes

2.2 Equipement constituant l'appareillage de mesure

2.2.1 Le voltmètre de choc ;

Le voltmètre de choc est un appareil utilisé pour nous donner directement par affichage numérique la valeur de tension de crête fournie par le générateur à l'objet d'essai. Il complète parfaitement le travail de l'oscillographe qui lui , nous donne la forme de l'onde.

Tr = Transformateur

D = Soupape redresseuse

Rd = Résistances de décharge

R₁ = Résistances de charge

R_p = Résistances de queue
(parallèles)

R_s = Résistances de front (série)

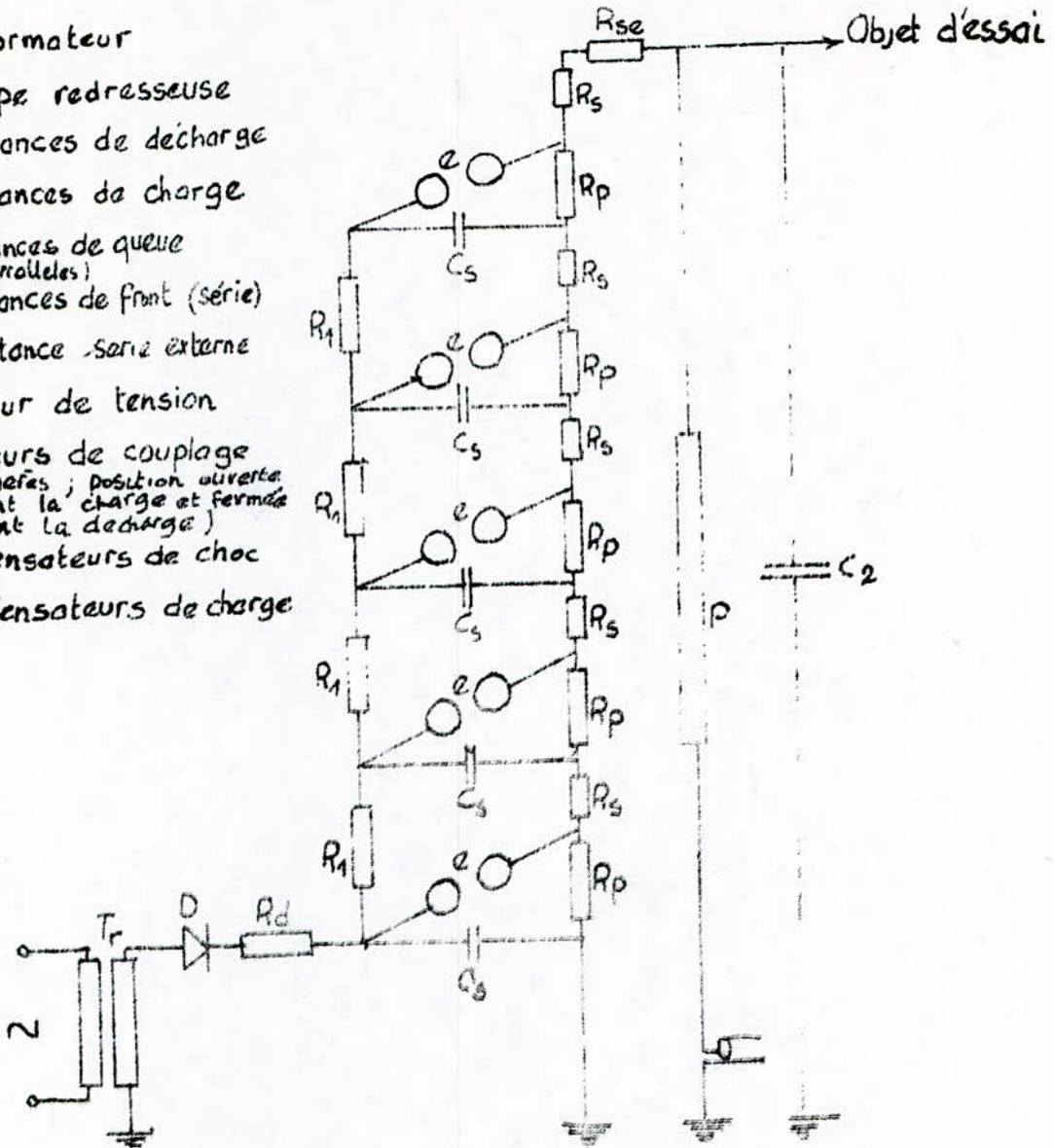
R_{se} = Résistance série externe

P = diviseur de tension

e = éclateurs de couplage
(à sphères ; position ouverte
pendant la charge et fermée
pendant la décharge)

C_s = Condensateurs de choc

C₂ = Condensateurs de charge



Fig

Générateur de choc utilisant le montage de E. Marx.

Le voltmètre de choc est un appareil assez fragile , pour cela il doit être protégé par un blindage, surtout contre les champs extérieurs. Les éléments principaux constituant notre appareil sont :

- transformateur d'isolement
- stabilisateur de la tension de réseau
- alimentation stabilisée
- circuit d'étalonnage
- remise à zéro automatique
- atténuateur d'entrée à haute impédance
- (Impédance) indicateur numérique et (ou) enregistreur
- principe de fonctionnement :

Le voltmètre de choc est raccordé par un câble coaxial au diviseur de tension auquel est appliquée l'onde de choc à H. T. devant être mesurée. Une résistance terminale non inductive est incorporé à l'appareil de façon à éviter toute réflexion à l'extrémité du câble. Cette résistance est muni de prises et sert en même temps d'atténuateur permettant de faire varier la sensibilité de l'appareil. On peut mesurer les valeurs de crêtes positives ou négatives.

La mesure se fait par charge successive de plusieurs étages de condensateurs. La tension maximale est mesurée par un circuit électronique et transmise en galvanomètre de précision. Une fois la lecture effectuée, le voltmètre de choc est remis à zéro, soit manuellement au moyen d'un bouton poussoir, soit automatiquement avec une temporisation ajustable.

On peut compléter le voltmètre de crête par un appareil enregistreur permettant l'enregistrement automatique de valeurs mesurées.

2.2 Diviseurs de tension

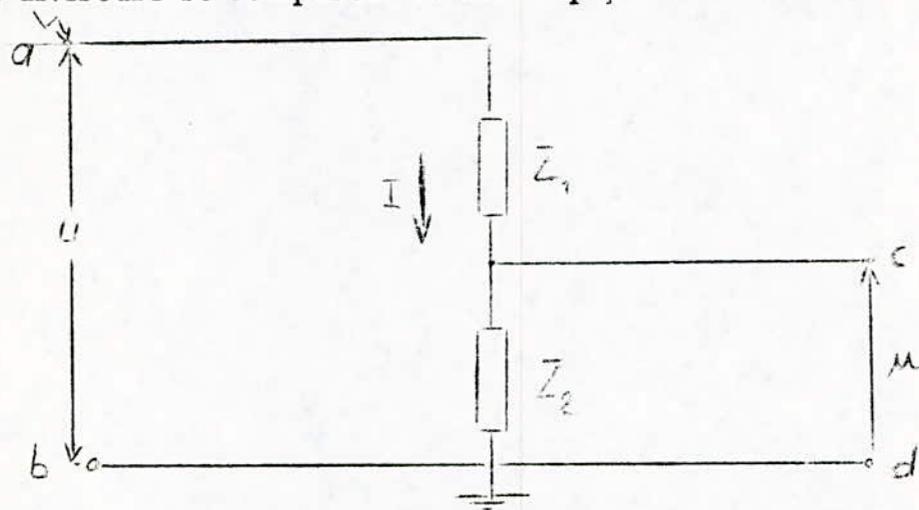
Il existe différents types de diviseurs de tension :

- le diviseur résistant simple
- le diviseur mixte: - résistant capacitif
- le diviseur capacitif
- le diviseur à écran de répartition du champ

Schéma de principe:

Le schéma de principe de ces diviseurs est le même mais les éléments qui les composent ne sont pas les mêmes .

Ces diviseurs se composent de deux impédances en série Z_1 et Z_2



La tension fournie par le générateur de choc est appliquée entre a et b

Le câble **coaxiale** reliant le diviseur avec le voltmètre de choc est branché aux bornes B. T.

Les courants traversant l'appareillage de mesure sont supposés négligeables alors on a :

$$U = (Z_1 + Z_2) \cdot I \quad \text{et} \quad u = Z_2 \cdot I$$

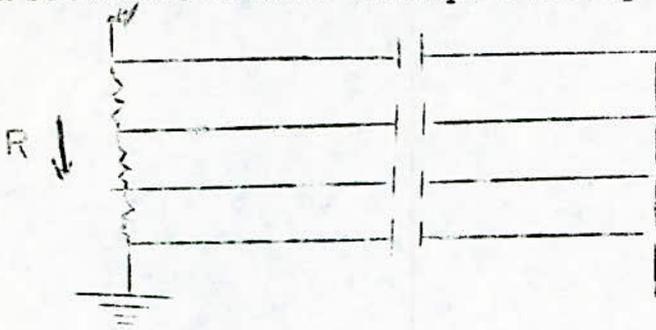
d'où
$$U = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot I \quad I = K \cdot U \quad \text{avec} \quad K = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Les diviseurs dont les impédances sont des résistances pures sont appelés " Diviseur résistant simple".

Le rapport de réduction $K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ en régime stationnaire

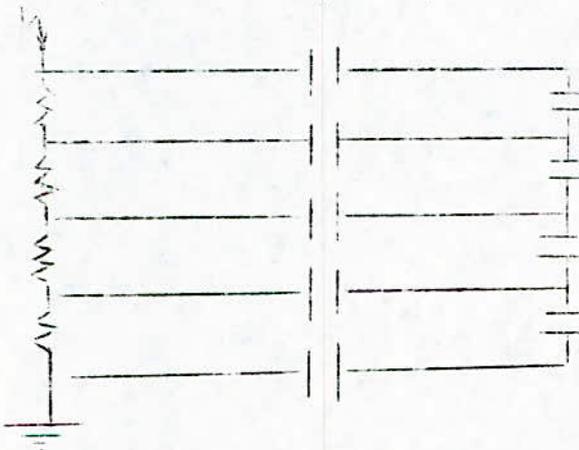
Il y a des capacités parasites en régime transitoire entre la colonne résistante de l'élément H. T. et la terre. Le rapport de réduction K n'est plus valable car les capacités au sol mettent un certain temps pour se décharger quand on applique la tension de choc.

Voici un schéma de diviseur ohmique avec capacités parasites au sol



Pour réduire les capacités parasites on doit placer des capacités longitudinales (construction de K. Berger) le long de la colonne résistante pour que la répartition capacitive dès les premiers instants de choc devient à la répartition résistive. Donc on suppose que toutes constantes de temps dans ce cas ($R L$) des éléments de la colonne sont égales et que les capacités longitudinales sont importantes devant les capacités parasites.

Le diviseur mixte (résistif - capacitif)



Ce diviseur a l'inconvénient que sa réaction du circuit de mesure est importante sur le circuit de mesure d'essai.

La capacité du diviseur mixte est importante de l'ordre de 500 à 1 000 p F

K

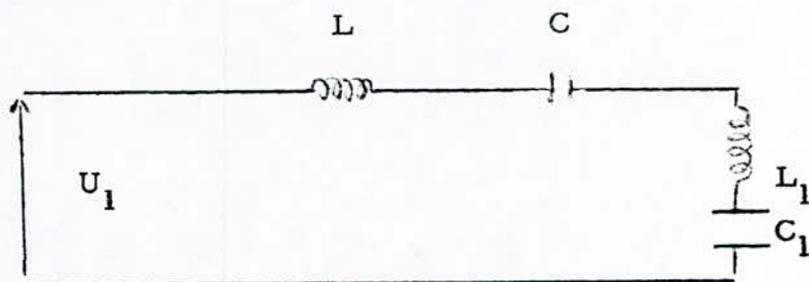
1°) le diviseur de tension à écrans de répartition de champs

La protection contre les capacités parasites ; on a le même effet avec une répartition de champ électrostatique le long du diviseur qui correspond à la répartition résistante des potentielles. Le courant dans ce cas est le même tout le long de la colonne et représente à tout instant avec fidélité le signal appliqué à son sommet. On réalise la répartition linéaire du champ électrostatique le long du diviseur par deux écrans conducteurs placés aux bornes de ce diviseur ou par un écran dans la partie supérieure et le sol-conducteur constitué par un métal non magnétique.

Le cas parfait, est un diviseur mixte avec écran

2°) le diviseur capacitif

Schéma de principe



La base de ce diviseur est constituée par une capacité et le dispositif dans son ensemble est du type oscillant. Le diviseur capacitif est une bonne solution pour la mesure de tension de choc brèves.

Le temps de réponse du diviseur capacitif dépend du type de montage de la base du diviseur, les difficultés qu'on rencontre pour utiliser ces diviseurs proviennent de l'inductance résiduelle du circuit B. T qui ne doit pas dépasser une valeur plus grande (pour un rapport de 100) de l'ordre de 0,5 , cas impossible à réaliser avec des éléments ordinaires. On est obligé d'utiliser d'autres éléments c.à.d. des capacités spéciales dont l'inductance apparente vue du circuit de mesure s'annule.

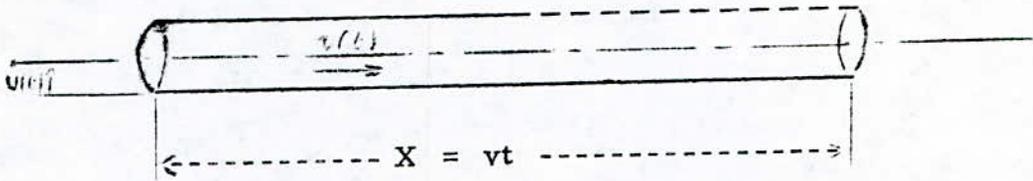
2.2.3 Le câble coaxial

Constitué par deux conducteurs concentriques isolés l'un par rapport à l'autre. Le conducteur extérieur est formé par une gaine tressée en cuivre qui a une inductance.

Les deux conducteurs constituent un système capacitif, si on applique une tension $U(t)$ à l'entrée du câble coaxial qui se propage à la vitesse V , le temps qui met le signal pour se propager le long du câble est :

$t = \frac{X}{V}$, X = longueur du câble. Il se déduit toujours une onde de courant se propageant le long d'un tronçon x du câble $i(t) = \frac{U(t)}{Z}$ avec Z l'impédance caractéristique du câble qui est défini et donné par la relation :

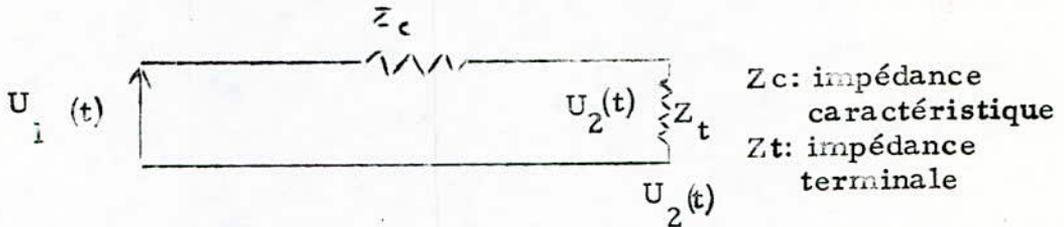
$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{ou} \quad L, \text{ et } C \text{ sont l'inductance et la capacité totale du câble.}$$



2.2.4 Réflexion et adaptation d'un câble coaxial :

Lorsque le générateur de tension de choc est branché à une extrémité du câble coaxial, il y a des ondes qui se propagent le long de ce câble jusqu'à atteignant l'autre extrémité puis elles sont plus ou moins réfléchies selon la charge. L'onde qui va vers cette charge est l'onde incidente et l'onde qui rebrousse chemin et dite réfléchié .

On peut représenter le câble coaxial par un schéma équivalent :



On montre que le rapport de l'onde transmise à l'onde incidente est le **taux de transmission K** ; il est égal à :

$$K = \frac{2 Z_t}{Z_c + Z_t} = \frac{2 Z_t / Z_c}{(Z_t / Z_c) + 1}$$

On définit aussi le **taux de réflexion Kr** par le rapport de l'onde réfléchié à l'onde incidente :

$$K_r = \frac{Z_t - Z_c}{Z_t + Z_c} = \frac{(Z_t / Z_c) - 1}{(Z_t / Z_c) + 1}$$

K_r est en général un nombre complexe de la forme : $K_r = A e^{j\varphi}$

avec A et φ respectivement l'amplitude et la phase de l'onde réfléchié par rapport à l'onde incidente. L'impédance Z_t , suivant sa position et sa valeur on peut avoir plusieurs cas différents qui peuvent se présenter :

1°) Quand l'extrémité de la ligne est court-circuités Z_t est nulle

$$K_t = 0 \quad K_r = -1$$

$$A = 1 \quad \text{et} \quad \varphi = +\pi$$

Dans ce cas il y a réflexion totale et l'onde réfléchie est en opposition de phase avec l'onde incidente à l'extrémité de la ligne. L'onde qui est transmise en ce point est nulle. Donc l'énergie fournie est totalement réfléchie.

2°) Si l'extrémité de la ligne est ouverte, $Z_t = \infty$: on trouve d'après les formules de $K_t = 2$ et $K_r = +1$ $A = 1$ et $\varphi = 0$

On a donc réflexion totale, dans ce cas l'onde incidente et l'onde réfléchie sont en phase et l'énergie fournie est totalement réfléchie.

La tension U_2 à l'extrémité du câble est double de U_1 la tension incidente

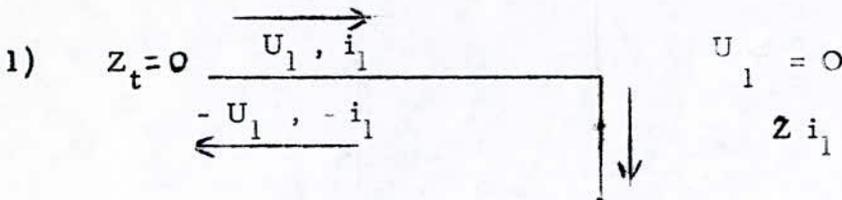
3°) Quand l'extrémité de la ligne est fermée sur Z_t différente de Z_c :

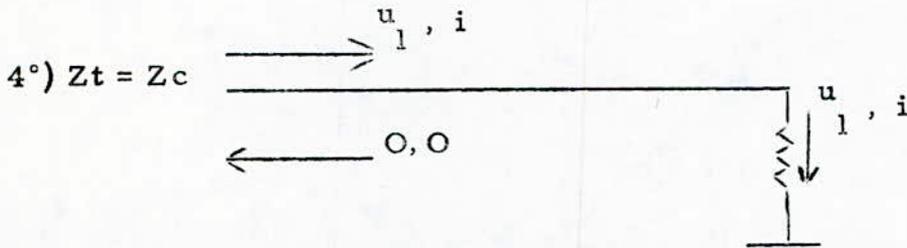
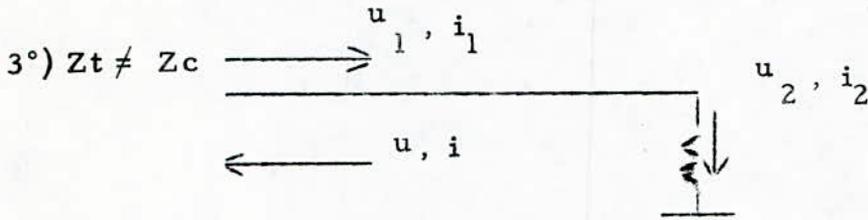
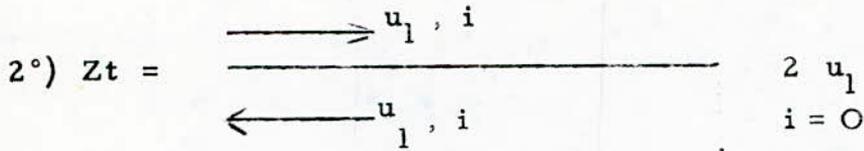
Dans ce cas on a une transmission partielle et réflexion de l'onde. Les coefficients K_t et K_r sont fonction de Z_t et Z_c . Une partie de l'énergie est absorbée par l'impédance Z_t

4°) Quand l'extrémité de la ligne est fermée sur une impédance égale à l'impédance caractéristique de l'onde : $Z_t = Z_c$, $K_t = 1$ et $K_r = 0$

Dans ce cas il n'y a pas de réflexion et l'onde incidente est entièrement transmise. L'énergie fournie est entièrement absorbée par Z_t le câble se comporte comme un organe retardateur qui transmet le signal jusqu'aux bornes de Z_t . On dit alors que le câble est adapté sur son impédance caractéristique.

Présentation des différents cas :





Ces résultats ne sont valables que si les lignes de champ électrique et magnétique sont perpendiculaires. C'est notre cas

2.3 Station d'essai de tension de choc de l'E.N.P. :

L'installation comporte l'équipement suivant :

- a) générateur de choc avec les dispositifs de charge et de commande installé sur un châssis unique et mobile
- b) diviseur de tension à écrans de répartition de champ
- c) oscillographe à rayons cathodiques
- d) autres équipements électriques et accessoires

Description de l'équipement de notre station de choc avec le principe de fonctionnement du générateur de choc :

2.3.1 Générateur de choc : type à "colonnes"

Basé sur le principe de . E . Marx .

Ce générateur comporte 8 étages. Chacun d'eux est équipé d'un condensateur de choc C_s (180 nF, 75 KV) d'une résistance de charge R_1 (7000) correspondante d'une résistance de queue (parallèle) R_p (430), d'une résistance de front ou série R_s (10) et d'un éclateur de couplage à deux sphères F_s de mêmes diamètres (ϕ 12,5 Cm)

Tous les étages ont les mêmes caractéristiques.

Les condensateurs sont disposés les uns au dessus des autres et montés dans un cylindre en papier bakélinisé et séparés les uns des autres par de l'huile. Les bornes du condensateur sont placées latéralement sur le cylindre isolant. Le générateur de choc est chargé en couplage doubleur de tension, le condensateur de l'étage inférieur possède alors une prise intermédiaire.

Une colonne isolante est placée à côté de la colonne de condensateurs. Les résistances séries et parallèle (R_s et R_p) sont montées entre cette colonne et le cylindre bakélinisé de condensateurs. Elle porte aussi les sphères fixes des éclateurs de couplage.

Une autre colonne en papier bakélinisé porte les sphères mobiles des éclateurs de couplage, elle est tournante sur un pivot et peut être actionnée du pupitre au moyen du volant par l'intermédiaire d'une commande par câbles, ainsi on règle l'écartement des sphères des éclateurs.

La colonne tournante porte la résistance de charge R_1 qui sert à charger les condensateurs des étages supérieurs.

L'équipement de charge du générateur de choc :

- transformateur d'isolement (1,2 KVA, 220 V/220, 50 HZ) qui sert à isoler tous les circuits de commande de l'installation .
- transformateur de régulation de tension
- transformateur de redresseur (380 V / 60 000 V , 50 HZ)
- redresseur avec une alternance
- la résistance de mesure de tension de charge de 7 000

2.3.2 Principe de fonctionnement du générateur de choc :

Le générateur de choc est mis en fonctionnement grâce à l'amorçage de ces éclateurs de couplage.

Cet amorçage est provoqué par la solidation ou par le déclenchement d'un seul éclateur, l'expérience montre que les autres éclateurs amorcent également aussitôt après, spontanément en quelque sorte.

Ce phénomène a été expliqué (dans un exposé antérieur), au moyen d'un schéma de remplacement d'après (1).

Cependant seuls les phénomènes transitoires résultant du premier éclateur furent examinés à ce moment là des points de vue théorique et expérimental et il a été montré que ces phénomènes provoquaient l'amorçage des éclateurs suivants.

Les essais qui ont été faites donnent un bon aperçu du mécanisme d'amorçage dans le montage de Marx depuis l'amorçage du premier éclateur jusqu'à l'amorçage du dernier.

Il a été établi d'après des recherches antérieures que l'amorçage des éclateurs est provoquée par des surtensions. Cependant la valeur aussi bien que la durée de ces surtensions sont inconnues pour tous les éclateurs à l'exception du premier qui amorçe à cause du dépassement de sa tension disruptive et de l'éclateur suivant dont la tension a été évaluée et mesurée dans (1). Dans le cas général

Le principe de tous les générateurs permettant de produire des ondes de choc est donc le même c. à. d. charger en parallèle des condensateurs ensuite au moment voulu se déchargent en série. Dans le cas de plusieurs étages c. à. dire plusieurs condensateurs, on les charge successivement jusqu'à attendre le dernier.

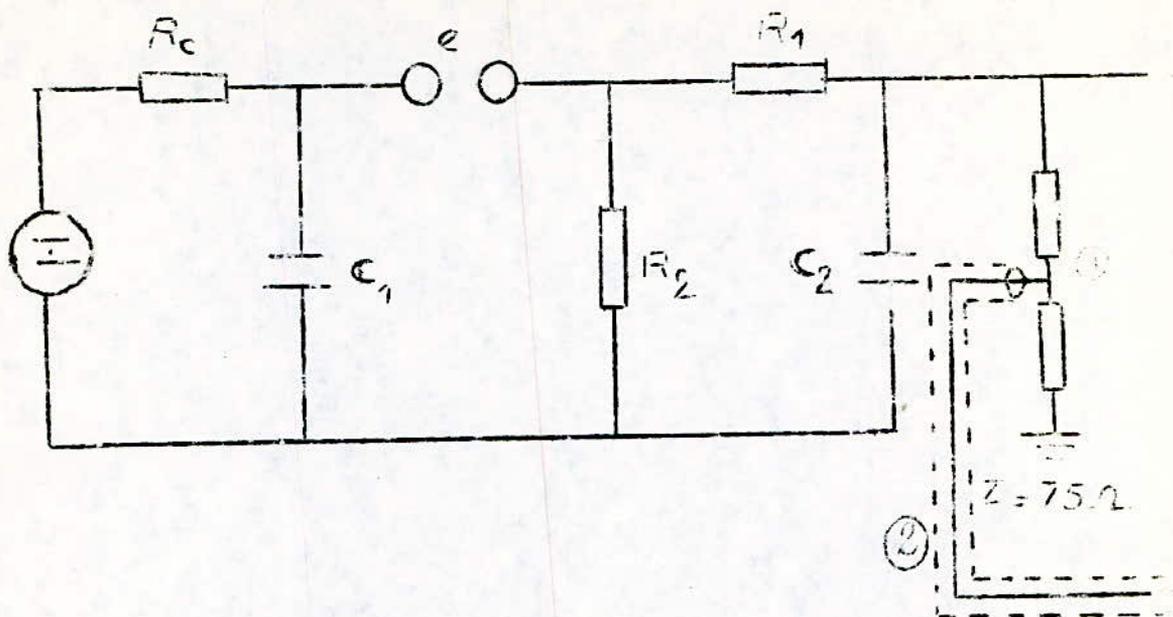
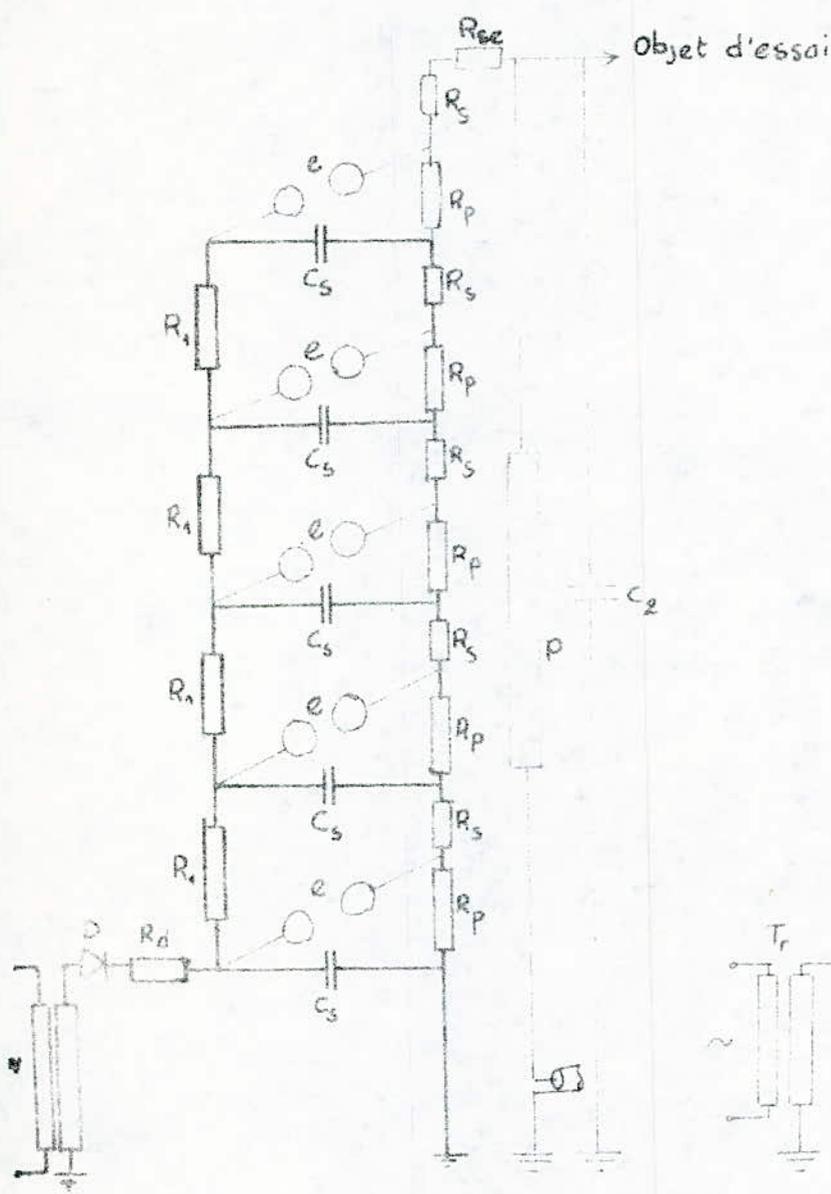


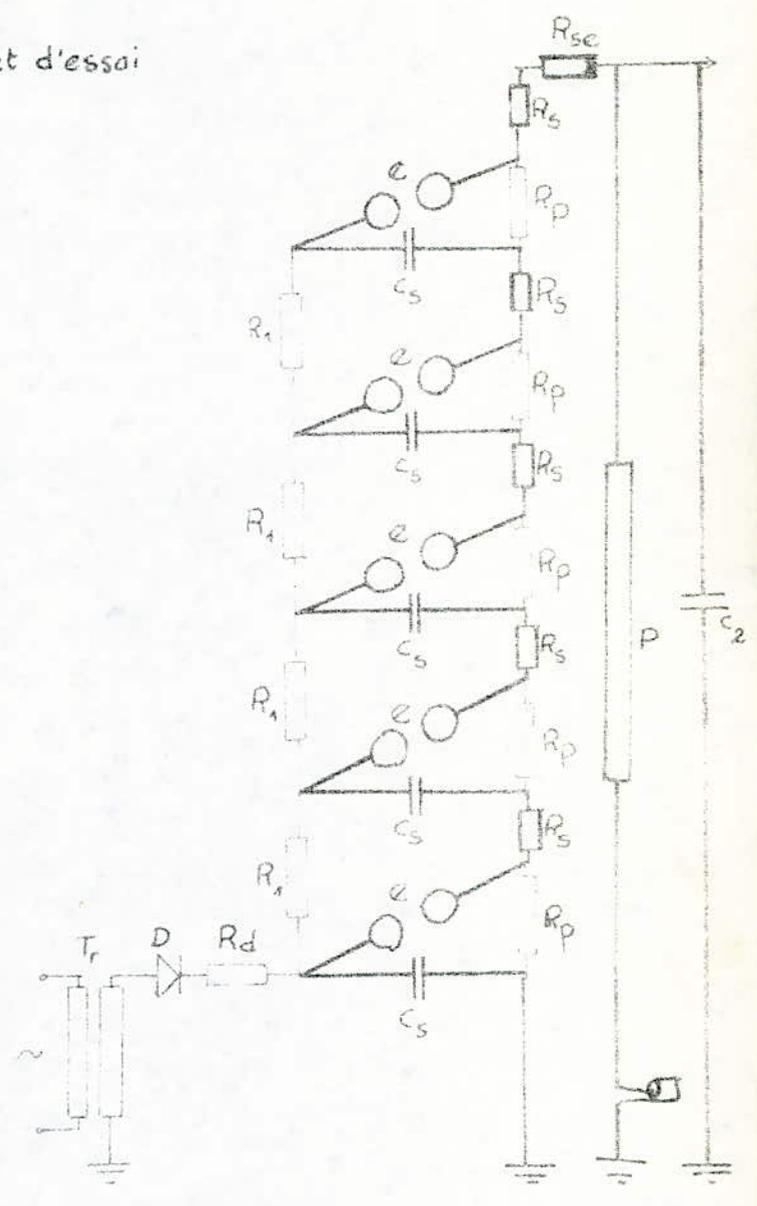
Fig.1 Schéma simplifié du générateur de choc E. MARX

avec circuit de mesure

- R_c : résistance de décharge
- e : éclateur
- C_1 : condensateur de choc
- R_1 : résistance série (ou de front)
- R_2 : résistance parallèle (ou de queue)
- C_2 : condensateur de charge
- 1 : diviseur de tension
- 2 : câble coaxiale
- 3 : objet d'essai



Charge d'un générateur de choc utilisant le montage de Marx.



Décharge d'un générateur de choc utilisant le montage de Marx.

2.3.3 Les différents types de "couplage" du générateur de choc :

- Couplage A : Ce 1er cas de couplage est celui où tous les condensateurs au moment du déclenchement se déchargent en série; la capacité de choc est huit fois plus petite que la capacité d'un étage. C'est le montage 600 KV

- Couplage B : Ce 2eme cas de couplage est celui où certains étages se déchargent en parallèle et les autres en série; 4 en série et 2 en parallèle
Ce cas donne une augmentation de capacité de choc et une diminution de la tension de charge. C'est le montage 300 KV

- Couplage C : Ce 3eme cas de couplage comporte deux étages en série et 4 étages en parallèle. Ce qui donne au moment de charge une tension $1/4$ de la tension de charge totale et une augmentation de la capacité considérable (16 fois) : (150 KV)

Ces différents types de couplage permettent d'adopter l'installation de choc aux objets suivant leurs capacités et tension.

Cette souplesse de notre générateur nous permet d'essayer par exemple : les objets moyenne tension possédant une grande capacité.

Tableau donnant les valeurs pour les différents couplages de (tensions, capacités , résistances) etc...

Couplage	A	B	C
Tension de charge totale	600 kV	300 kV	150 kV
Etages en séries	8	4	2
Etages en parallèle	I	2	4
Capacité de choc C_I	22,5 nF	90 nF	360 nF
Charge capacitive C_2	2 nF	2 nF	2 nF
Résistance série R_I	80 ohms	40 ohms	20 ohms
Résistance parallèle R_2	3440 "	860 "	215 "

2.3.4 Pupitre de commande:

Comprend tous les dispositifs de commande et de contrôle de l'installation de choc.

Sur le panneau frontal du pupitre se trouvent deux volants de commande. Un pour actionner par l'intermédiaire d'une transmission par câbles la colonne isolante tournante qui porte les aphères mobiles des éclateurs de couplage, dont on peut ainsi ajuster l'écartement à distance. La longueur d'étincelle est indiquée par l'instrument. Sur l'axe de la colonne tournante est monté un potentiomètre qui règle le courant passant dans l'instrument de mesure en fonction de l'angle de rotation. Le deuxième volant permet un réglage de la tension d'alimentation du transformateur redresseur H.T. Les instruments indiquent le courant et la tension primaire du redresseur H.T.

Un autre instrument de mesure pour la lecture de la tension de charge du condensateur de choc. Un contacteur à clé et un interrupteur principal pour l'alimentation de toute l'installation de choc. Sur le panneau latéral gauche se trouve la prise de courant à 4 pôles pour le raccordement de l'installation de choc au réseau. A côté se trouvent encore 3 prises de courant. Une pour l'alimentation de l'oscillographe cathodique, la 2ème pour la fermeture du ~~circuit~~ de protection (portés etc...) et la 3ème prise pour l'alimentation des lampes de signalisation.

2.35 Redresseur de charge

Le redresseur de charge peut fournir la tension de charge de 75 KV des condensateurs de choc. Il est relié à l'étage inférieur directement, par l'intermédiaire d'une connexion. L'énergie nominale fournie est de 4 KWS (4 KJ) On choisit la polarité de la tension de charge au moyen du commutateur est placé sur la position intermédiaire entre les polarités positives et négatives, le redresseur est mis à la terre.

Toute l'installation est mise à la terre au travers de la résistance d'amortissement de terre.

Le redresseur est monté sur une cuve métallique remplie d'huile, son transformateur H.T est suspendue au couvercle de cette cuve.

Les soupapes haute tension sont montés chacune entre deux plaques en papier bakéliné, sur un support en plexiglass, de chaque côté du transformateur.

Les extrémités libres des soupapes sont connectés à deux bornes du condensateur placé sur le couvercle, selon que le générateur de choc est chargé de polarité positive ou négative.

2.3.6_Oscillographe cathodique et diviseur de tension_

1/ L'oscillographe cathodique modèle 80 ; c'est un appareil à un faisceau avec tube scellé à cathode chaude, pour la mesure et l'enregistrement de tensions de choc, et d'autres phénomènes non repérés du domaine des micro secondes. L'appareil est constituée par une unité compacte facilement transportable. Les boutons de réglage se trouvent sur la plaque frontale tandis que les prises de mesure et de déclenchement sont à l'arrivé de l'appareil. Il peut enregistrer toutes les formes d'ondes allant de 1 à 5 000 μ s . Il est alimenté par le réseau à travers un transformateur d'isolement dimensionné pour 20 KV choc et protégé contre les influences extérieures.

L'écran métallisé plat permet de prendre des oscillogrammes d'une grande clarté dépourvus de distorsions.

L'oscillographe est équipé de deux entrées A et B ainsi que d'une auxiliaire A11 . Chaque entrée principale est combinée avec un diviseur RC à haute impédance formant ainsi un atténuateur à 10 positions. L'oscillographe peut être combiné avec le générateur de choc à répétition HAEFELY et former un équipement compacte.

2/ Le diviseur de tension utilisé à l'E.N.P. est le type avec résistance et écrans de répartition du champ.

La résistance de l'élément H.T est $20 \text{ k}\Omega$, celle de l'élément B.T est $72,78 \Omega$. Son rapport de réduction est de 528, la résistance primaire est montée dans un cylindre en papier baké et rempli d'huile. La résistance secondaire est protégée par la douille dans laquelle est vissé le câble coaxial de l'oscillographe.

2.3.7 Objet d'essai . Isolateurs à capot et tige

- Essais d'isolateurs suspendus

a) rôle des isolateurs :

Le rôle des isolateurs des lignes aériennes est de retenir mécaniquement les conducteurs aux structures qui les supportent et d'assurer l'isolement électrique entre ces 2 éléments.

b) les contraintes :

Les différentes contraintes qui peuvent frapper une ligne haute tension et endommager le matériel électrique, sont dues essentiellement aux sur-tensions de foudres et de manoeuvres ...

c) tension de contournement des isolateurs suspendus :

Le contournement consiste en une décharge disruptive extérieure à l'isolateur et se produisant entre les parties qui sont normalement soumises à la tension de service.

- la tension de tenue au choc à sec est la valeur spécifiée de tension de choc qui doit être appliquée à l'isolateur dans les conditions prescrites .

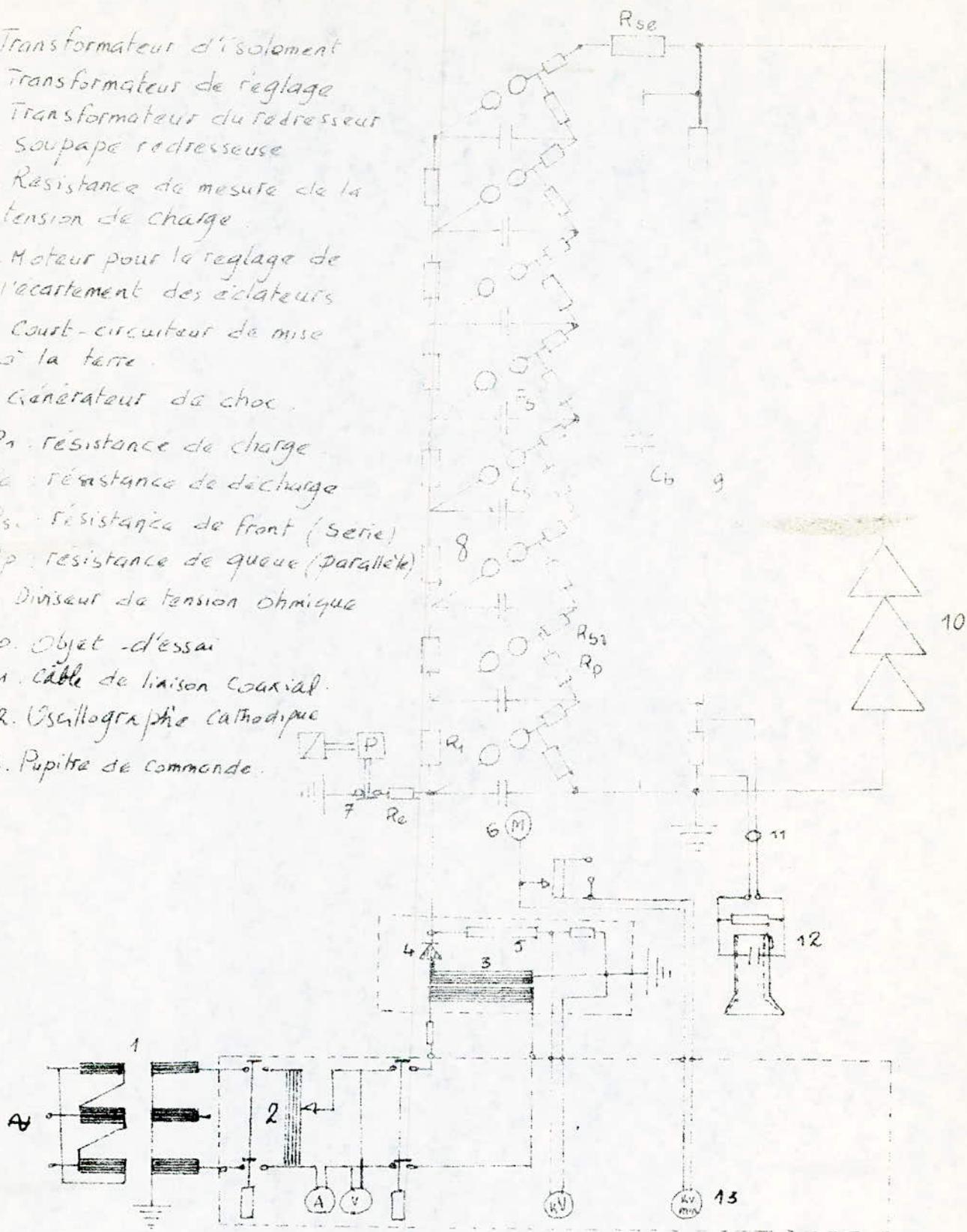
- la tension 50% de contournement au choc à sec est la tension de choc qui appliquée dans les conditions prescrites, a une probabilité de 50% de provoquer un contournement de l'isolateur.

Donc on considère généralement comme tension de contournement au choc la tension $U_{50\%}$.

- Variation de la tension de contournement au choc en fonction du temps de décharge.

1. Transformateur d'isolation
2. Transformateur de réglage
3. Transformateur du redresseur
4. Soupape 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

- R_1 : résistance de charge
 R_2 : résistance de décharge
 R_s : résistance de front (série)
 R_p : résistance de queue (parallèle)
 9. Diviseur de tension ohmique
 10. Objet d'essai
 11. Câble de liaison coaxial
 12. Oscillographe cathodique
 13. Pupitre de commande



Schema de principe de la station de choc d'essais de tension de l'E.N.P.

CHAPITRE III : METHODES STATISTIQUES ET ESSAIS

3-I Méthode des paliers multiplés:

Les décharges disruptives sont des phénomènes aléatoires et pour cela la CEI-60 suppose qu'à chaque niveau de tension d'essai U est attachée une probabilité spécifique P qu'une décharge disruptive se produise. La fonction de distribution est exprimée à l'aide de la valeur moyenne U_M et de l'écart type σ de la tension de décharge disruptive.

L'application de plusieurs tensions nous permet d'obtenir l'expression de la fonction ainsi que les paramètres cités à condition que les caractéristiques de l'objet restent invariables pendant les essais.

En pratique le nombre d'applications exécutées pendant les essais est limité donc les valeurs de U sont évaluées dans certaines limites de précision les valeurs mesurées sont appelées U et pour les essais au choc on fait une application répétée de tension de forme constante et durant lesquelles pour chaque niveau de tension on compte la proportion d'applications de la tension occasionnant des décharges disruptives, les résultats sont reportés sur un graphique gaussio-arithmétique en mettant la tension sur l'axe linéaire, si ces points se situent approximativement sur une droite la distribution est à peu près gaussienne, la tension correspondant à l'intersection de la droite avec le niveau où la probabilité est égale à 0,5 peut être utilisée comme une détermination approximative de la valeur moyenne U et l'intervalle entre les probabilités $P = 0,5$ et $P = 0,16$ comme une estimation de (s) .

Pour un nombre (n) de mesures on peut définir les limites dans lesquelles se situent la vraie valeur moyenne U_M et le vrai écart-type σ avec une probabilité $C_c = 0,95$ c'est-à-dire des intervalles de confiance à 95% .

ESSAI: pour une onde de polarité positive :

I: / un élément d'une chaîne d'isolateurs :

on applique à un élément d'une chaîne d'isolateurs au moins 10 chocs par niveau de tension et $\Delta U = 1,0\%$ de la tension de décharge disruptive 50% est l'intervalle entre chaque niveau de tension .

on commence par le niveau U_0 qui ne donne aucune décharge disruptive après l'application de 40 chocs on augmente le niveau de tension d'une valeur ΔU c'est à-dire le second niveau sera $U_I = U_0 + \Delta U$ et après 40 autres chocs on passe au niveau suivant qui est :

$U_2 = U_I + \Delta U$ ainsi de suite jusqu'à la tension $U_{100\%}$ qui nous donne une décharge disruptive à chaque application .

A / Le tableau des résultats :

I : correspond à une décharge disruptive

O ; correspond à une tenue

Les essais réalisés s'orientent uniquement vers un apperçu sur la distribution statistique de la probabilité de décharges disruptives , l'examen de la distribution de probabilités nous donne une idée de l'appartenance possible d'une distribution laplace-gaussienne autour de la valeur moyenne $U_{50\%}$.

I / Pour les 40 premiers chocs:

La Vérification est faite par une méthode graphique comme celle décrite par la CEI-60.

D'après notre graphique on voit bien que les points obtenus d'après les coordonnées suivantes sont alignés suivant une ligne droite.

PROBABILITE	0,05	0,15	0,35	0,55	0,65	0,90	0,95
TENSION (K V)	122	124	126	128	130	132	134

cela témoigne que la distribution de la probabilité de décharges disruptives est normale.

C/ Ajustement de la Courbe:

On remplace l'échelle des ordonnées en probabilités par les valeurs de la variable normé (t), ces conditions on aura un système de coordonnées cartésiennes. d'après les points obtenus , on peut mettre en évidence une courbe d'ajustement comme dans notre cas c'est une droite qui est représentée. de trouver l'équation de la droite qui peut être de la forme : $t = aU + b$ et pour cela il existe plusieurs méthodes on choisi celle des moindres carrés.

D/ Méthode des moindres carrés:

Principe: parmi toutes les courbes qui approches un ensemble donné de points, la courbe présentant la propriété:

$$d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2 = \text{minimum.}$$

est la meilleure courbe d'ajustement avec

: La distance entre un point est la courbe

L'équation de la droite des moindres carrés est de

$$\text{forme : } t - \bar{t} = a (U - \bar{U})$$

$$\text{avec : } a = \frac{\sum U_i T_i - n \bar{t} \bar{U}}{\sum U_i^2 - n (\bar{U})^2}$$

-nous avons les valeurs suivantes:

U_i (KV)	122	124	126	128
Pr	0,05	0,15	0,35	0,50
T_i	-1,65	-1,04	-0,39	-0,1

U_i (KV)	130	132	134
Pr	0,65	0,90	0,95
T_i	0,39	1,29	1,05

La moyenne $\bar{U} = \frac{\sum U_i}{n} = \frac{896}{7} = 128 \text{ KV}$

La Moyenne $\bar{t} = \frac{\sum t_i}{n} = \frac{0,38}{7} = 0,05 \text{ KV}$

La pente $a = \frac{\sum U_i t_i - n \bar{t} \bar{U}}{\sum U_i^2 - n (\bar{U})^2} = \frac{79,32 - 7 \cdot 128 \cdot 0,05}{114800 - 114800} = 0,27$

L'équation de la droite:

$$t - \bar{t} = a (U - \bar{U})$$

$$t = 0,27 (U - 128)$$

$$t = 0,27 U - 34,61$$

E / Facteur de Corrélation

le facteur de Correlation

$$r = \frac{\sum (U_i - \bar{U}) (t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum (U_i - \bar{U})^2 \sum (t_i - \bar{t})^2}}$$

$$r = \frac{28,32}{\sqrt{814,25}} = 0,99$$

Le facteur de corrélation est très proche de un, comme il mesure la qualité de l'ajustement des données d'échantillonnage par la régression des moindres carrés, on a pour ($r = 1$) une corrélation linéaire parfaite et également une régression linéaire parfaite.

- Graphiquement l'attention $U_{50\%}$ correspond à la tension donnée par la projection du point ($t = 0$) sur la droite de régression et l'intervalle de tension donnée par la projection des deux points ($t = -1$) et ($t = +1$) sur cette même droite nous donne la double valeur de l'écart-type (s), les valeurs trouvées sont :

$$\bar{U} = 128,2 \text{ kV}$$

$$s = 4 \text{ kV} \text{ d'où } s = 3\% \text{ de la tension } 50\%$$

ce résultat s'accorde avec la valeur prévue par la norme CEI-60 .

F / Intervalle de confiance à 95% :

avec une erreur maximum de 0,05, la valeur de $U_{50\%}$

comprise dans l'intervalle :

$$U_{50} = \bar{U} \pm 1,96 \sqrt{\frac{s^2}{n}}$$

avec n : somme des fréquences absolues de claquage

$$\text{d'où } U_{50} = 128,2 \pm 1,96 \sqrt{\frac{4}{n}} = 128,2 \pm 0,8 \text{ kV}$$

$$127,4 \leq U_{50} \leq 129 \text{ kV}$$

G / Zone de confiance pour la droite de régression :

soit (\hat{t}) la valeur estimée de (t) pour la valeur donnée de U obtenue à partir de la courbe de régression de (t)

la quantité :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (t - \hat{t})^2}{n}}$$

donne alors une mesure de dispersion par rapport à la courbe de régression et s'appelle erreur type d'estimation .

l'erreur type d'estimation a des propriétés analogues à celles de l'écart-type car la construction d'une paire de droites parallèles à la droite de régression situées à des distances verticales : S , $2S$ et $3S$ de celle-ci pour n suffisamment grand nous trouverons : 68% , 95% et 99,7% des points d'échantillonnage inclus dans les intervalles d'espace ainsi défini .

nous avons la valeur estimée : $\hat{t} = 0,27 U - 34,61$ donnée par le tableau suivant :

U	122	124	126	128	130	132	134
t	-1,65	-1,04	-0,39	0,13	0,39	1,29	1,29
\hat{t}	-1,47	-1,13	-0,59	-0,05	0,49	1,03	1,57
$t - \hat{t}$	0,02	0,09	0,20	0,18	-0,1	0,26	0,08

on a $s = \sqrt{\frac{\sum (t - \hat{t})^2}{n}} = \sqrt{\frac{0,73}{7}} = 0,15$
 $2s = 0,30$

D'après le graphique la bande constituée par les deux droites parallèles à la droite de régression nous indique qu'on a une probabilité de 85% que la droite de régression appartienne à cette bande la théorie prévoit ~~85%~~ cela aurait été voisin de cette valeur si l'échantillon était plus grand.

les deux droites parallèles à la droite de régression se trouvent à une distance verticale de (2S) de celle-ci.

II / Pour les 40 chocs :

Tableau des probabilités de décharges disruptives en fonction des tensions appliquées :

Pr	0,05	0,125	0,375	0,475	0,650	0,875	0,925
U	122	124	126	128	130	132	134

D'après le graphe on voit que les points sont approximativement alignés suivant une ligne droite donc on peut conclure que la distribution de la probabilité est normale

A / Ajustement de la courbe :

Méthode des moindres carrés :

L'équation de la droite des moindres carrés est de la forme

$$t - \bar{t} = a (U - \bar{U})$$

avec
$$a = \frac{\sum U_i t_i - n \bar{t} \bar{U}}{\sum U_i^2 - n (\bar{U})^2}$$

Tableau des valeurs :

U_i	122	124	126	128	130	132	134
t_i	1,65	0,94	0,32	0,06	0,39	1,15	1,44
Pr	0,05	0,125	0,375	0,475	0,65	0,875	0,925
$U_i t_i$	201,3	116,56	40,32	16,48	50,7	151,8	132,96

La moyenne : $\bar{U} = \frac{\sum U_i}{n} = \frac{896}{7} = 128 \text{ kV}$

la moyenne : $\bar{t} = \frac{\sum t_i}{n} = \frac{0,01}{7} = 0,0014$

d'où $s = \frac{29,6 - 7 \cdot 128 \cdot 0,0014}{\sqrt{114800 - 7(128)^2}} = 0,25$

donc l'équation de la droite de régression est :

$$t = 0,25 U - 32$$

B / Facteur de corrélation :

$$r = \frac{(\sum U_i t_i) - n \bar{U} \bar{t}}{\sqrt{(\sum U_i^2 - n \bar{U}^2)(\sum t_i^2 - n \bar{t}^2)}} = \frac{29,6 - 7 \cdot 128 \cdot 0,0014}{\sqrt{(114800 - 7(128)^2)(7,24 - 7(0,0014)^2)}$$

d'où $r = 0,995$

donc le facteur de corrélation est très proche de un .

- Graphiquement on trouve la fonction de probabilité de

décharge 50% : $\bar{U} = 128 \text{ kV}$

et l'écart-type : $s = 4 \text{ kV}$

d'où $s = 3\%$ de $U_{50\%}$ qui est dans les normes .

C / Intervalle de confiance à 95% :

$$\text{on a } U_{50} = \bar{U} \pm 1,96 \frac{4}{\sqrt{177}} = 128 \pm 1,96 \frac{4}{\sqrt{177}}$$

$$U_{50} = 128 \pm 0,6 \text{ kV} \quad \text{d'où } 127,4 \leq U_{50} \leq 128,6 \text{ kV}$$

D / Zone de confiance pour la droite de régression :

$$\text{On a l'erreur type d'estimation : } S = \sqrt{\frac{\sum (t - \hat{t})^2}{n}}$$

avec la valeur estimée : $\hat{t} = 0,25 U - 32$

Tableau des valeurs :

U	I22	I24	I26	I28	I30	I32	I34
t	-1,65	-0,94	-0,32	0,39	1,15	1,74	
t̂	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5
t-t̂	-0,15	0,06	0,18	-0,06	-0,11	0,15	-0,06
(t-t̂) ²	0,022	0,003	0,032	0,003	0,012	0,022	0,03

$$s = \sqrt{\frac{0,178}{7}} = 0,16 \quad \text{et} \quad 2S = 0,32$$

d'après le graphe la bande constituée par les deux droites parallèles à la droite de régression se trouvent à une distance verticale égale à $(2S)$ contient 86% des points donc on a les mêmes remarques que le cas précédent .

-Conclusion :

Pour un nombre de chocs ($n=20$) ou ($n=40$) , la plage dans laquelle se trouve la tension de probabilité 50% de décharges disruptives ne varie pas beaucoup , donc pour des résons économiques on préfert prendre un nombre de chocs $n=20$ pour le reste de nos essais avec la méthode des paliers multiples .

II / Essai avec 2 éléments de la chaîne d'isolateurs :

Pour un élément de la chaîne on a utilisé le montage 150 kV du générateur de chocs et pour deux éléments on utilise le montage 300kV de ce générateur .

A / Tableau des résultats :

donné par le tableau II .

B / Vérification de la normalité de la distribution :

tableau des probabilités de décharges disruptives en

fonction des tensions appliquées :

Pr	0,15	0,40	0,80	0,95
U	252	256	260	264

Les points ainsi obtenus s'alignent approximation
suivent une droite donc on peut supposer que la distri-
bution de la probabilité de décharge disruptive est
normale .

C / Ajustement de la courbe :

a) méthode des moindres carrés :

Equation de la droite : $t - \bar{t} = a (U - \bar{U})$

avec
$$a = \frac{\sum U_i t_i - n \bar{t} \bar{U}}{\sum U_i^2 - n (\bar{U})^2}$$

b) Tableau des valeurs :

U_i	252	256	260	264
Pr	0,15	0,40	0,80	1,65
$U_i t_i$	-262,08	-66,56	221	435,6
U_i^2	63504	65536	67600	69696
t_i	-1,04	-0,26	0,85	1,65

$$\bar{U} = \frac{\sum U_i}{n} = \frac{1032}{4} = 258$$

$$\bar{t} = \frac{\sum t_i}{n} = \frac{1,2}{4} = 0,3$$

$$a = \frac{328 - 4 \cdot 0,3 \cdot 258}{266336 - 4 \cdot 258^2} = \frac{18,4}{80} = 0,23$$

Equation de droite de régression :

$$t - 0,30 = 0,23 (U - 258)$$

$$t = 0,23 U - 59$$

D / Facteur de corrélation :

$$r = \frac{\sum (U_i - \bar{U}) (t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum (U_i - \bar{U})^2 \sum (t_i - \bar{t})^2}} = \frac{18,36}{\sqrt{80 \cdot 4,23}} = 0,997$$

r est très proche de un donc on a une bonne qualité de l'ajustement des points par la droite .

- Graphiquement on trouve la tension 50% de probabilité de décharge $\bar{U} = 257$ kV

et l'écart-type $s = 4,5$ kV d'où $s = 2\%$ de $U_{50\%}$

E / Intervalle de confiance à 95% :

$$\text{on a } U_{50} = \bar{U} \pm 1,96 \frac{s}{\sqrt{n}} = 257 \pm 1,96 \frac{4,5}{\sqrt{67}}$$

$$U_{50} = 257 \pm 1 \text{ kV d'où}$$

$$256 \leq U_{50} \leq 258 \text{ kV}$$

F / Zone de confiance pour la droite de régression :

$$\text{L'erreur type d'estimation : } S = \sqrt{\frac{(t-\hat{t})^2}{n}}$$

avec la valeur estimée : $\hat{t} = 0,23 U - 59$

Tableau des valeurs:

U	252	256	260	264
t	-1,04	-0,26	0,85	1,65
\hat{t}	-1,04	-0,12	0,80	1,72
$t-\hat{t}$	0	-0,14	0,05	-0,07
$(t-\hat{t})^2$	0	0,02	0,003	0,005

$$S = \sqrt{\frac{0,028}{4}} = 0,08 \text{ et } 2S = 0,16$$

dans la figure on voit que la bande constituée par les deux droites parallèles à la droite de régression et

distantes ~~chaque~~ d'une distance verticale de (2S) de cette droite , contient 100% des points or que la théorie prévoit 95% cela est dû au nombre insuffisant de points obtenus .

mais on peut dire qu'on a une probabilité de 95% pour que la droite réelle se trouve à l'intérieure de cette bande .

III / Essais avec trois éléments de la chaîne d'isolateurs

A / Tableau des résultats :

Les résultats sont donnés par le tableau III.

B / Vérification de la normalité de la distribution :

Tableau des probabilités de décharges en fonction des tensions :

Pr	0,2	0,25	0,65	0,90
U	392	400	408	416

Grafiquement on voit que la distribution suit une loi normale .

C / Ajustement de la courbe :

a) méthode des moindres carrés :

equation de la droite : $t - \bar{t} = a (U - \bar{U})$

b) Tableau des valeurs :

U_i	392	400	408	416
U_i^2	153664	160000	166464	173056
Pr	0,2	0,25	0,65	0,9
t_i	-0,85	-0,68	0,39	1,29
$U_i t_i$	-333,2	- 272	159,1	536,6

La moyenne $\bar{U} = \frac{1616}{4} = 404 \text{ kV}$

La moyenne $\bar{t} = \frac{0,15}{4} = 0,03$

$a = \frac{90,54 - 4 \cdot 404 \cdot 0,03}{653184 - 4 (404)^2} = 0,13$

d'où $t - 0,03 = 0,13 (U - 404)$

$t = 0,13 U - 52,5$ équation de la droite de régression .

La valeur de la moyenne ainsi que celle de l'ecart-type $\bar{U} = 403 \text{ kV}$

$s = 8,5 \text{ kV}$ soit $s = 2\%$ de \bar{U}

C / Intervalle de confiance à 95% :

on a $U_{50} = \bar{U} \pm 1,96 \frac{s}{\sqrt{n}} = 403 \pm 1,96 \frac{8,5}{\sqrt{4}} = 403 \pm 2$

d'où $401 \leq U_{50} \leq 405 \text{ kV}$

D / Zone de confiance pour la droite de régression:

La valeur estimée est donnée par : $\hat{t} = 0,13 U - 52,5$

on a les valeurs suivantes :

U	392	400	403	418
t	0,66	0,68	0,79	1,29
\hat{t}	-1,54	-0,50	0,54	1,58
$t - \hat{t}$	0,69	0,18	0,15	0,29
$(t - \hat{t})^2$	0,47	0,03	0,022	0,08

$s = \sqrt{\frac{0,60}{4}} = 0,39$ d'où $2s = 0,78$

La bande constituée par les deux droites parallèles situées à une distance verticale de (2s) de la droite

La régression englobe tous les points on pratiquement une probabilité de 100% que la droite de régression réelle se trouve à l'intérieur de cette bande .

E / Facteur de corrélation :

$$r = \frac{\sum (U_i t_i) - n \bar{U} \bar{t}}{(\sum U_i^2 - n(\bar{U})^2)(\sum t_i^2 - n(\bar{t})^2)} = \frac{12}{320(3-4(0,03)^2)} = 1$$

Le facteur de corrélation très proche de un .

F / Tension 2% de décharges disruptives :

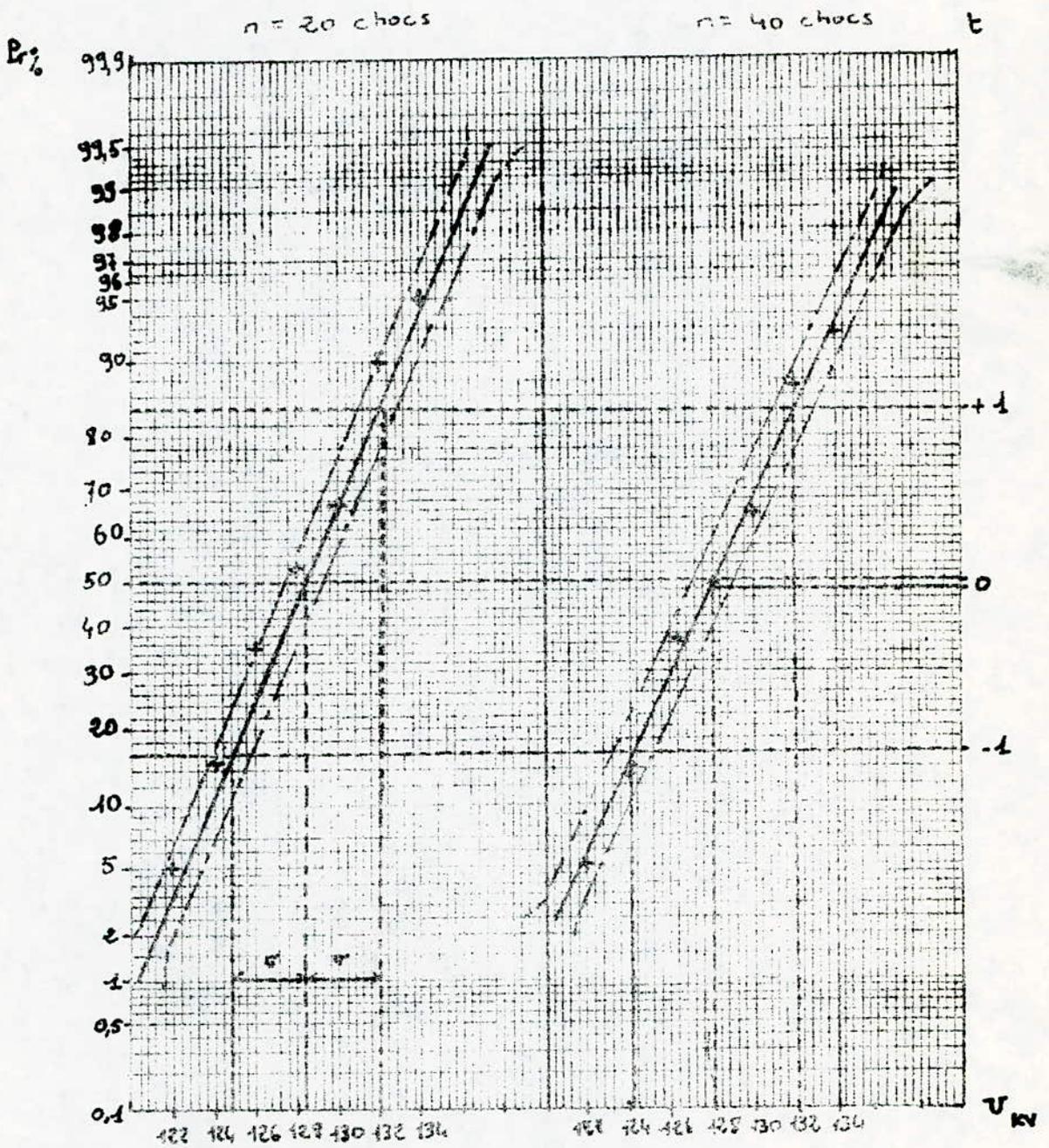
- Pour un élément de la chaîne d'isolateurs :

La tension 2% est donnée directement par la droite de régression , c'est la valeur de la tension correspondant à la probabilité 2% .

Graphiquement , par la projection du point de probabilité 2% sur la droite de régression , puis sur l'axe des tensions ; on trouve :

$$U_{2\%} = 122 \text{ kV}$$

Courbes de régression pour un élément de la chaîne d'isolateurs

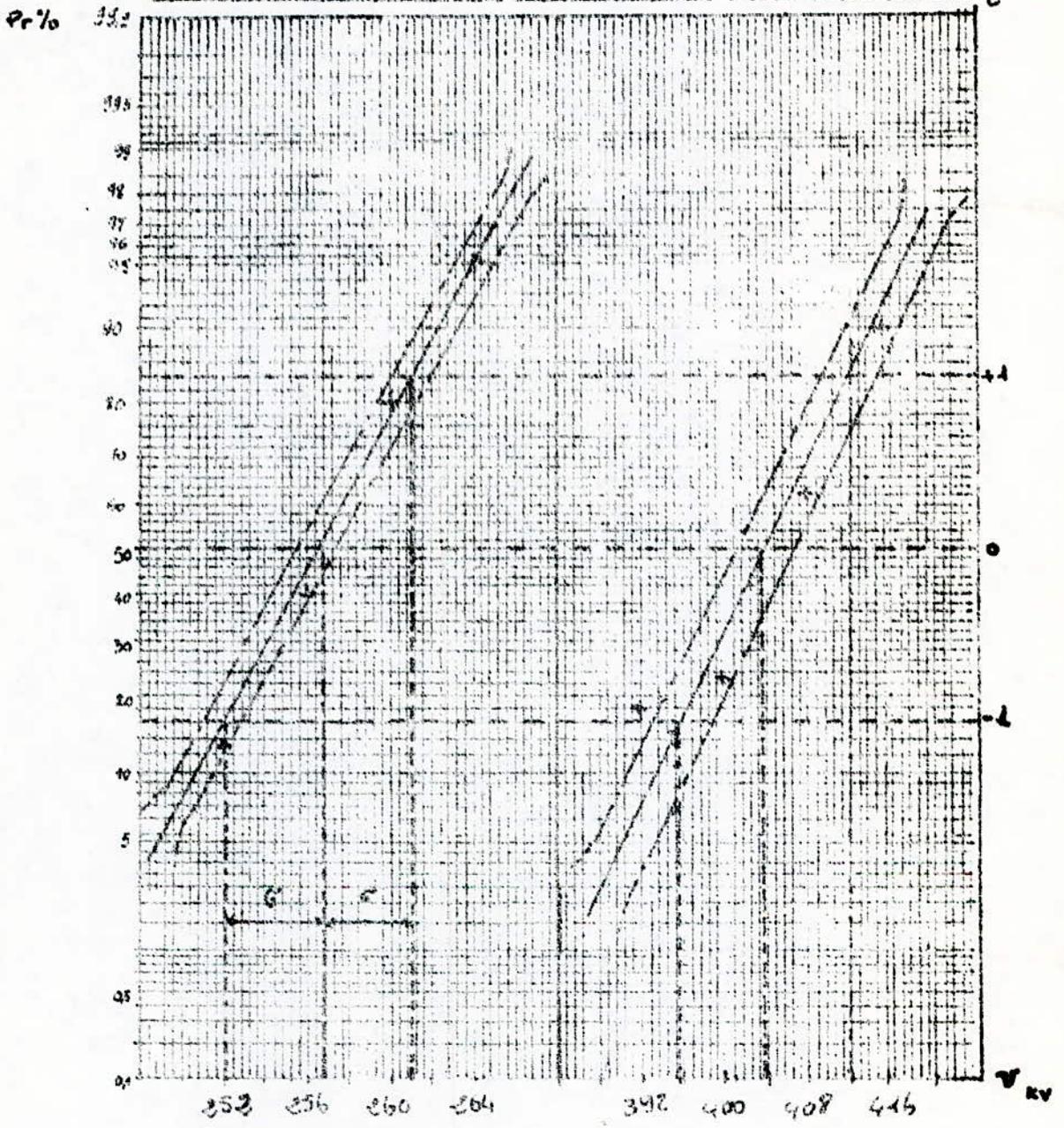


$\bar{U} = 128 \text{ kV}$
 $\bar{\sigma} = 4 \text{ kV}$

$\bar{U} = 128 \text{ kV}$
 $\bar{\sigma} = 4 \text{ kV}$

Courbes de régression pour

3 éléments de la chaîne	3 éléments de la chaîne
-------------------------	-------------------------



$\bar{U} = 257 \text{ kV}$
 $\sigma = 4,5 \text{ kV}$

$\bar{U} = 403 \text{ kV}$
 $\sigma = 8,5 \text{ kV}$

3-II / méthode de "MONTÉE ET DESCENTE"

Principe de la méthode :

Cette méthode consiste à appliquer N impulsions consécutives, en partant d'un niveau de tension U_0 et en augmentant ou en diminuant le niveau de tension de l'impulsion suivante d'un pas de tension ΔU , selon que le résultat de l'application d'une impulsion a été une tenue ou une décharge .

Pour éviter une longue séquence de chocs inutiles, le niveau de tension U_0 est choisi de manière à avoir une probabilité inférieure à 5% de se trouver en présence de plus de trois chocs inutiles, dans ce cas on prend une tension de départ U_0 proche de la tension ($U_{50} - 2\sigma$) que l'on tire des résultats précédents , donc U_0 est choisie très proche de U_{50} et l'intervalle ΔU est compris dans :

$$2\sigma \leq U \leq 5\sigma \text{ de } U_{50}$$

Alors après l'application de U_0 s'il ne se produit pas de décharge disruptive; l'application suivante aura pour amplitude ($U_0 + \Delta U$), s'il y a décharge l'application suivante aura l'amplitude ($U_0 - \Delta U$) .

La précision et le centrage des résultats dépendent du choix du nombre utile d'impulsions de la tension de départ U_0 est du pas ΔU .

L'erreur peut provenir du fait que les résultats sont distribués autour d'une valeur moyenne , et du fait que la valeur moyenne peut ne pas être centrée sur la valeur

vraie U. .
 pour quantifier ces divergences L.J.DIXON et A.M.MOOD
 ont donné une méthode applicable seulement dans le cas
 où la distribution de la variable aléatoire étudiée suit
 une loi statistique normale .

A / Calcul de la tension disruptive $U_{50\%}$:

La valeur de la tension 50% de décharge disruptive est
 calculée d'après la formule donnant la moyenne de la
 distribution :

$$U_{50\%} = \bar{U} = U_0 + d \left[\frac{A}{N} \pm 0,5 \right] \quad \text{avec :}$$

U_0 : le niveau le plus faible de la tension de la série
 de chocs ayant donné lieu à des amorçages (ou de
 la série de chocs n'ayant entraîné aucun amorçage)

d : écart entre les niveaux de tension maintenu constant.

N : nombre d'application total de chocs ayant donné
 lieu à des amorçages (ou celui des chocs n'ayant
 pas donné d'amorçages) .

(\pm) : (+) si on utilise la série de chocs sans amorçage

(-) si on utilise la série de chocs avec amorçage

$A = \sum_i i \cdot n_i$ avec: n_i = nombre d'applications d'un niveau
 de tension U_i ayant entraîné (ou
 pas) des amorçages.

i = indice affecté à chaque n_i . on a
 $i = 0$ pour le niveau de tension U_i le
 plus faible c'est-à-dire U_0 .

B / Calcul de l'écart-type :

L'écart-type est donné par la formule suivante :

$$s = 1,62 \cdot d \left[\frac{N \cdot B - A^2}{N^2} + 0,029 \right]$$

avec $B = \sum_i i^2 \cdot n_i$ et N, A et d sont les mêmes qu'avant.

C / Intervalle de confiance à 95% :

Pour cet intervalle de confiance la valeur de la tension $U_{50\%}$ sera comprise entre les valeurs suivantes :

$$U_{50\%} \pm 1,96 S_{\bar{u}} \quad \text{avec } S_{\bar{u}} = \frac{s \cdot G}{\sqrt{N}}$$

G : est déterminé graphiquement selon DIXON-MOOD

-fig I -

Résultats obtenus :

I / Pour un élément de la chaîne d'isolateurs :

Les résultats sont donnés par le tableau IV

I) Pour un nombre de chocs $N = 40$:

- Tableau des valeurs :

	fréquences		i	i . n _i		i ² . n _i	
	(I)	(O)					
I34 kV	0	0	5	0	0	0	0
I32 kV	4	0	4	16	0	64	0
I30 kV	4	4	3	12	12	36	36
I28 kV	8	4	2	16	8	32	16
I26 kV	3	9	1	3	9	3	9
I24 kV	0	4	0	0	0	0	0
N _I	19	21		19	21	19	21

a) Pour $N_I = 19$ c'est-à-dire le nombre de décharges

on a $A = \sum i \cdot n_i = 47$

et $B = \sum i^2 \cdot n_i = 135$

A / La tension $U_{50\%}$:

$$U_{50} = 124 + \left[\frac{47}{19} - 0,5 \right] \cdot 2 = 128 \text{ kV}$$

B / Ecart-type :

$$s = 1,62 \cdot 2 \left[\frac{19 \cdot 135 - (47)^2}{(19)^2} + 0,029 \right] = 3,3 \text{ kV}$$

d'où s = 2,5% de U₅₀

C / Intervalle de confiance à 95% :

Sur le graphe G fonction de $\frac{d}{\delta}$ - figI - on trouve pour $\frac{d}{\delta} = \frac{d}{\delta} = \frac{0}{3,3} = 0,6$ la valeur de G = 0,95

$$\text{d'où } s_u = \frac{3,3 \cdot 0,95}{\sqrt{40}} = 0,5$$

$$\text{donc } U_{50} = 128 \pm 1,96 \cdot 0,5 \text{ kV}$$

$$127 \leq U_{50\%} \leq 129 \text{ kV}$$

b) Pour N_I = 2I c'est-à-dire le nombre de tenues :

$$\text{dans ce cas on a } A = \sum i \cdot n_i = 29$$

$$\text{et } B = \sum i^2 \cdot n_i = 61$$

A / La tension U₅₀ :

$$U_{50} = 124 + 2 \left[\frac{29}{21} - 0,5 \right] = 128 \text{ kV}$$

B / Ecart-type :

$$s = 1,62 \cdot 2 \left[\frac{21 \cdot 61 - (29)^2}{(21)^2} + 0,029 \right] = 3,3 \text{ kV}$$

d'où s = 2,5% de U₅₀

REMARQUE :

Pour N_I = 19 ou N_I = 2I on trouve pratiquement le même résultat à l'erreur près car la probabilité de décharge 50% et la même que la probabilité de tenue 50%

C / Intervalle de confiance à 95% :

du graphe - fig I - pour $\frac{d}{s} = \frac{2}{3,3} = 0,6$ on trouve $G=0,95$

d'où $S_u = 0,5$

et

$$I27 \leq U_{50\%} \leq I29kV$$

2) Pour un nombre de chocs $N=30$:

- Tableau des valeurs :

	$f(I)$	$f(O)$	i	$i \cdot f(I)$	$i \cdot f(O)$	$i^2 \cdot n_i$	
I34 kV	1	0	5	5	0	25	0
I32kV	6	1	4	24	4	96	16
I30 kV	9	6	3	27	18	81	54
I28 kV	10	9	2	20	18	40	36
I26 kV	3	11	1	3	11	3	11
I24 kV	0	4	0	0	0	0	0
N_I	29	31		29	31	29	31

Pour $N_I = 29$:

on a $A = \sum i \cdot n_i = 79$

et $B = \sum i^2 \cdot n_i = 245$

A / La tension $U_{50\%}$:

$$U_{50\%} = I24 + 2 \left[\frac{79}{29} - 0,5 \right] = I28,4 \text{ kV}$$

B / L'ecart-type :

$$s = 1,62 \cdot 2 \left[\frac{29 \cdot 245 - (79)^2}{(29)^2} - 0,029 \right] = 3,4 \text{ kV}$$

d'où $s = 2,6 \%$ de $U_{50\%}$

C / Intervalle de confiance à 95% :

Pour $\frac{d}{s} = \frac{2}{2,6} = 0,77$ on trouve -fig I- $G = 0,97$

$$d'o\grave{u} \frac{s}{u} = \frac{s \cdot C}{\sqrt{N}} = \frac{2,6 \cdot 0,97}{\sqrt{60}} = 0,3$$

donc $U_{50\%} = 128,4 \pm 1,96 \cdot 0,3 = 128,4 \pm 0,6$

d'o\grave{u} $127,8 \leq U_{50\%} \leq 129 \text{ kV}$

Conclusion :

D'apr\es les r\esultats obtenus on voit que l'intervalle (o\grave{u} varie la tension disruptive $U_{50\%}$) varie d'une quantit\e presque n\egligeable pour le nombre d'application de chocs $N = 40$, donc on choisira le nombre $N = 40$ pour les prochains \eessais .

II / Deux \eel\ements de la cha\ene d'isolateurs :

Les r\esultats sont donn\es par le tableau V

- Tableau des valeurs :

	fr\equences		i	i . n _i	i ² . n _i		
	(I)	(O)					
268kV	1	0	4	4	0	16	0
264 kV	5	1	3	15	3	45	9
260 kV	9	5	2	18	10	36	20
256 kV	5	9	1	5	9	5	9
252 kV	0	5	0	0	0	0	0
N ₂	20	20		20	20	20	20

- Pour N = 20 d\echarges :

on a $A = i \cdot n_i = 42$

$B = i^2 \cdot n_i = 102$

A / Tension $U_{50\%}$:

$$U_{50} = 252 + 4 \left[\frac{42}{20} - 0,5 \right] = 258 \text{ kV}$$

B / Ecart-type :

$$s = 1,62 \cdot 4 \frac{20 \cdot 102 - (42)^2}{(20)^2} + 0,029 = 4,7 \text{ kV}$$

d'où $s = 2\%$ de $U_{50\%}$

C / Intervalle de confiance à 95% :

POUR $\frac{d}{s} = \frac{4}{4,7} = 0,85$ on trouve sur la -fig I-

la valeur $G = 0,98$ d'où $S_{\bar{u}} = \frac{4,7 \cdot 0,98}{40}$

donc $U_{50\%} = 258 \pm 0,7 \cdot 1,69 = 258 \pm 1 \text{ kV}$

$$257 \leq U_{50\%} \leq 259 \text{ kV}$$

III / Pour trois éléments de la chaîne d'isolateurs:

Les résultats sont donnés par le tableau VI

- Tableau des valeurs :

	fréquences		i	i . n _i		i ² . n _i	
	(I)	(O)					
416 kV	3	0	4	12	0	48	0
408 kV	12	3	3	36	9	108	27
400 kV	3	12	2	6	24	12	48
392 kV	1	4	1	1	4	1	4
384 kV	0	2	0	0	0	0	0
N ₃	19	21		19	21	19	21

Pour $N = 19$

$$\text{on a } A = \sum i \cdot n_i = 55$$

$$B = \sum i^2 \cdot n_i = 169$$

A / La tension $U_{50\%}$:

$$U_{50\%} = 384 + 8 \left[\frac{55}{19} - 0,5 \right] = 403 \text{ kV}$$

B / Ecart-type :

$$s = 1,62 \cdot 8 \left[\frac{19 \cdot 169 - (55)^2}{(19)^2} + 0,029 \right] = 7 \text{ kV}$$

d'où $s = 2\%$ de $U_{50\%}$

C / Intervalle de confiance à 95% :

Pour $\frac{d}{s} = \frac{8}{7} = 1,14$ on trouve $G = 1,1$

$$\text{d'où } S_{\bar{u}} = \frac{7 \cdot 1,1}{\sqrt{40}} = 1,2$$

donc $U_{50\%} = 403 \pm 2 \text{ kV}$

$$401 \leq U_{50\%} \leq 405 \text{ kV}$$

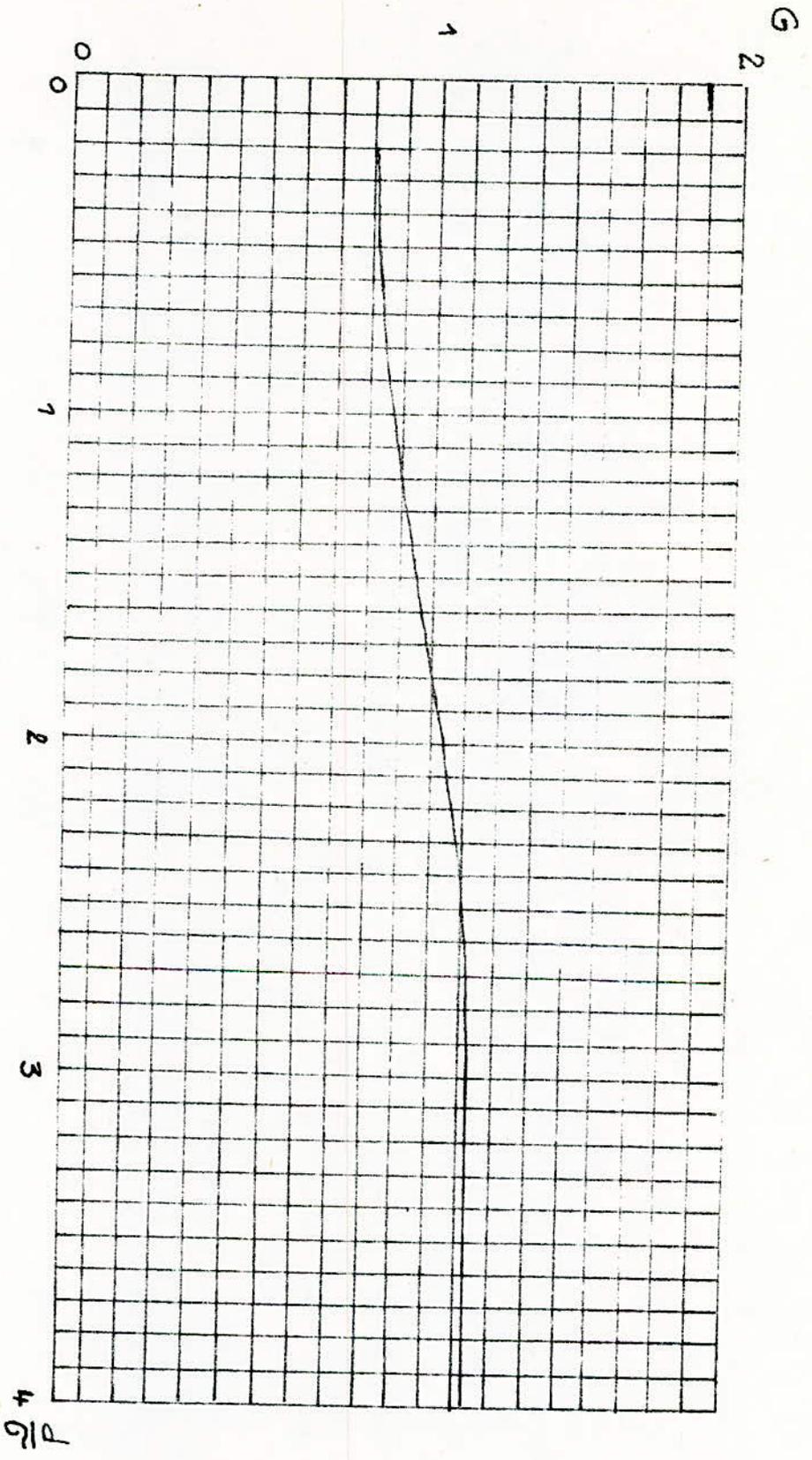


Fig. 1.

3 - III / La méthode de " Montée descente énergie "

- Principe :

on applique a un même objet une série de n impultions identique de tension de crête U .

La probabilité $P_m(U)$ pour qu'au moins une de ses impultions entraîne une décharge est donnée par la -fig I - pour m allant de 1 à 50 .

On applique la méthode de " Montée descente " avec une série de n impultions au lieu d'une par niveau de tention, et si l'on ne considère le résultat comme une tenue que si les m impultions sont des tenues , la valeur \hat{U}_m qui résulte de l'évaluation est une estimation de la valeur \bar{U}_m correspondant à la valeur $P(m) = 50\%$ d'où \bar{U}_m correspond à la valeur $P_I(m)$ de $P_I(U)$ qu'on peut obtenir des courbes de la figure I les valeurs $P_I(m)$ correspondant à $P_m = 50\%$ sont représentées par la-fig 2 - en fonction de m .

comme pour toute évaluation statistique , l'estimation ne coïncide avec avec la valeur vraie que pour un nombre infini d'essai , étant donné qu'en fait le nombre total d'impultions applicables à une isolation est limité , il est nécessaire d'examiner l'influence de l'influence de de l'estimation de toutes les causes de dispersion dues à cette limitation .

Précision de la méthode :

L'erreur provient de deux causes : l'une étant le fait que les résultats sont distribués autour d'une valeur moyenne \hat{U}_m^* , l'autre étant le fait que cette valeur moyenne peut ne pas être centrée sur la valeur \bar{U}_m donc pour cela on défini l'écart- type δ des résultats et la différence entre

la valeur moyenne et la valeur vraie .

Tensions appliquées :

Les niveaux de tension auxquels les series "utiles" d'essai ont lieu sont dans un voisinage de \bar{U}_m dans cette zone de tensions les fonctions $P_m(U)$ peuvent être représentées approximativement par les courbes de gauss passant par exemple par leurs points $P_m = 50\%$ et $P_m = 16\%$. en plus de \bar{U}_m , les fonctions $P_m(U)$ seront caractérisées par l'écart-type

$$\sigma_m = U_m(P_m = 50\%) - U_m(P_m = 16\%)$$

les valeurs de σ_m peuvent être déduites des courbes de la - fig I - , le rapport σ_m/σ_I est tracé sur la - fig 3 - en fonction de m .

Choix de la plus faible tension d'essai :

Lorsqu'on entreprend un essai de " notée desente élargie " il faut établir le niveau de tension de la première serie des impulsions , en générale on établit un niveau de tension de manière à avoir une probabilité inférieure à 5% de se trouver en présence de plus de trois séries inutiles; pour ce cas on pour objectif la tension de départ U_s proche de la tension serie $\bar{U}_m - 2\sigma_m$.

Comme on ne connaît ni \bar{U}_m ni σ_m on considère que la tension de départ U_s appliquée est distribuée autour de la tension U_s^* une distribution gaussienne autour de la tension U_s avec un écart-type σ_s ; un σ_s plus grand correspond à une plus grande " ignorance " de l'experimentateur .

Evaluation de la précision :

La valeur \hat{U}_m estimée après M series d'essais utiles est

distribuée autour de sa valeur moyenne U_m^* diffère de sa valeur vraie \bar{U}_m .

Evaluation du nombre réel d'impulsions :

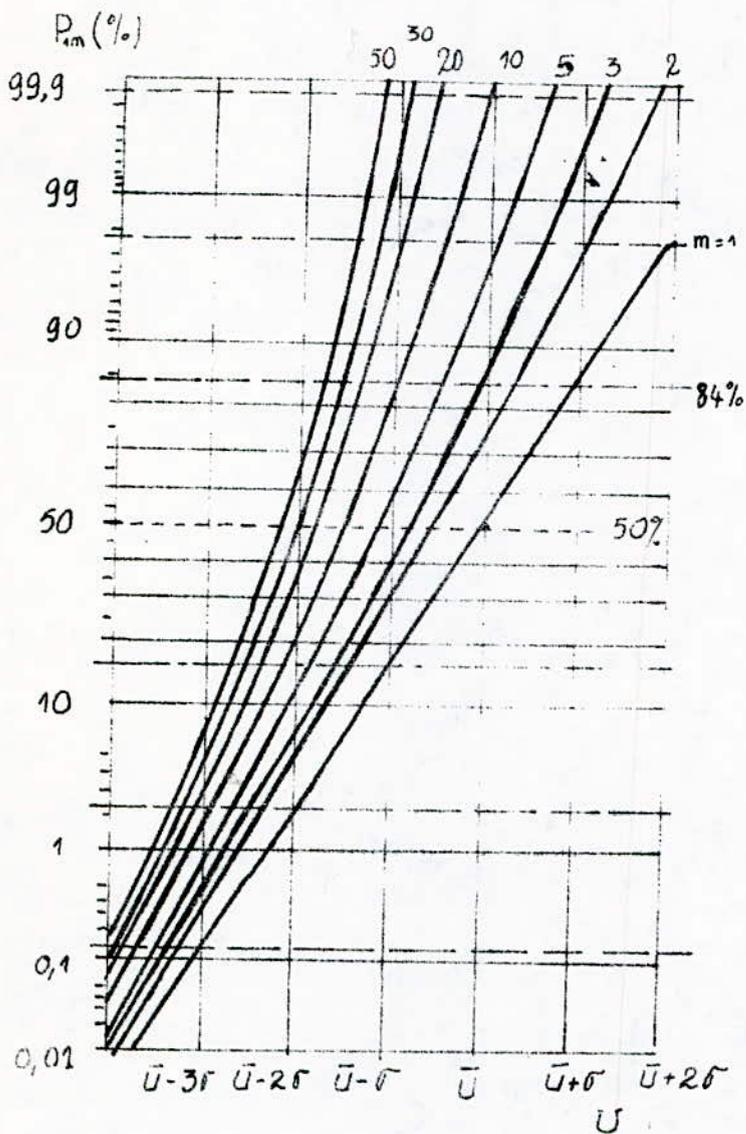
Le nombre d'impulsions réel N utilisé dans les essais est de nature statistique il dépend de plusieurs facteurs; les - fig 8 et 9 - donnent la valeur moyenne \bar{N} et la valeur maximale N_{\max} , le nombre maximal d'impulsions est $N_{\max} = M_{\max} \cdot m$. La moyenne est donnée par : $\bar{N} = (\bar{M} - 0,25(\bar{M} - 1)) m$. (2)
L'évaluation du nombre d'impulsions réellement appliquées permet de comparer plusieurs méthodes sur la base de la précision obtenue pour un même nombre d'impulsions.

Précision de l'estimation en fonction du nombre globale d'impulsions :

La - fig 10 - indique pour plusieurs probabilités choisies à priori la précision avec laquelle la tension correspondante peut être déterminée en fonction du nombre moyen (\bar{N}) d'impulsions. cette précision étant rapportée à l'écart-type σ_I de la distribution originale.

Evaluation de σ_I :

La méthode de " montée descente élargie " ne peut pas être employée généralement pour déterminer σ_m de la manière décrite par la méthode " montée descente " cependant en évaluant les tensions correspondant à différentes probabilités de décharge il est possible d'évaluer l'écart-type.
La - fig 11 - compare la précision susceptible d'être obtenue par trois méthodes pour un même nombre d'impulsions.



Probabilité $P_m = P_m(U)$ qu'a une série de m impulsions de produire au moins 1 décharge sur un objet qui a une probabilité de décharge $P_1(U)$. Pour chaque fonction $P_m = P_m(U)$ un écart-type équivalent σ_m peut être défini par la relation :

$$\sigma_m = U(P_m = 50\%) - U(P_m = 16\%)$$

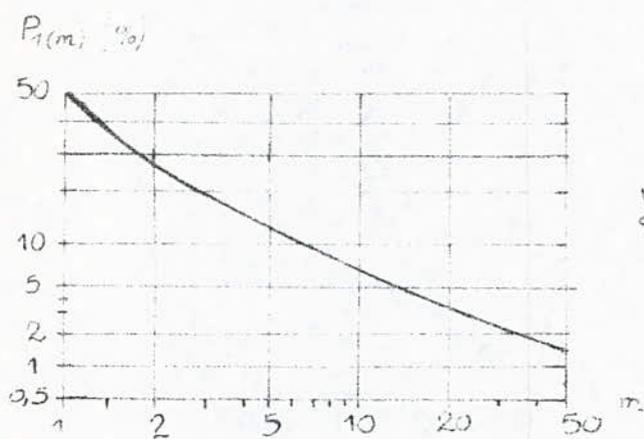
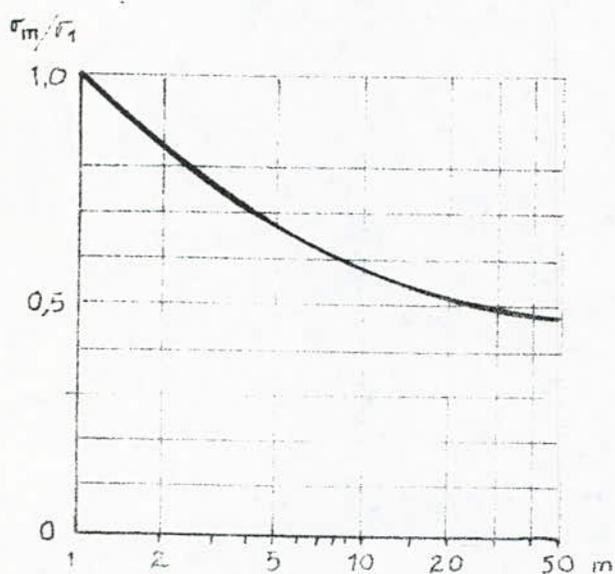
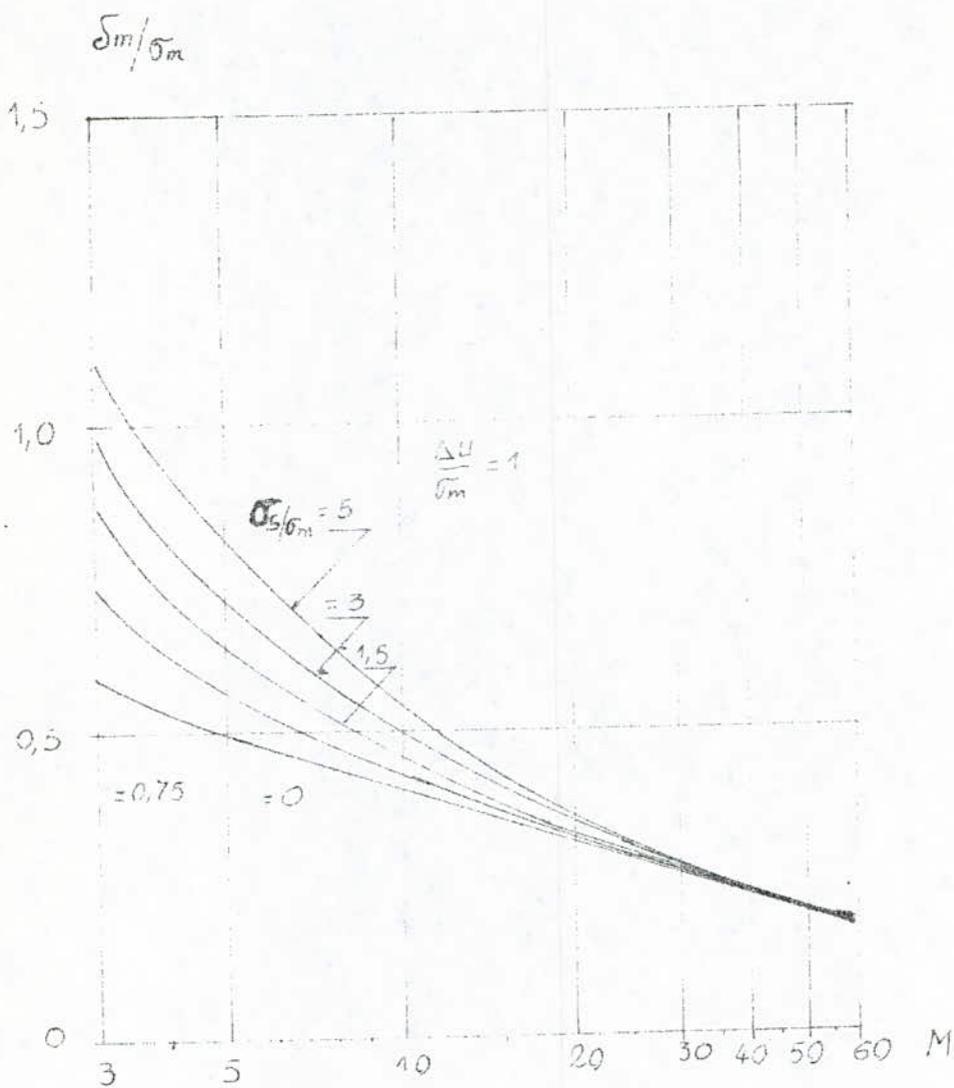


Fig 2.

Variation en fonction de m , de $P_1(m)$, valeur de $P_1(1)$ qui correspond à une probabilité de 50 % de donner au moins une décharge sur m impulsions appliquées.



Rapport de l'écart-type équivalent σ_m à l'écart-type σ_1 de l'isolation, en fonction du nombre m d'impulsions par série.



Variation de la précision δ_m/σ_m en fonction du nombre M de séries "utiles" pour différentes valeurs de "l'ignorance" σ_s/σ_m et pour $\Delta u/\sigma_m = 1$

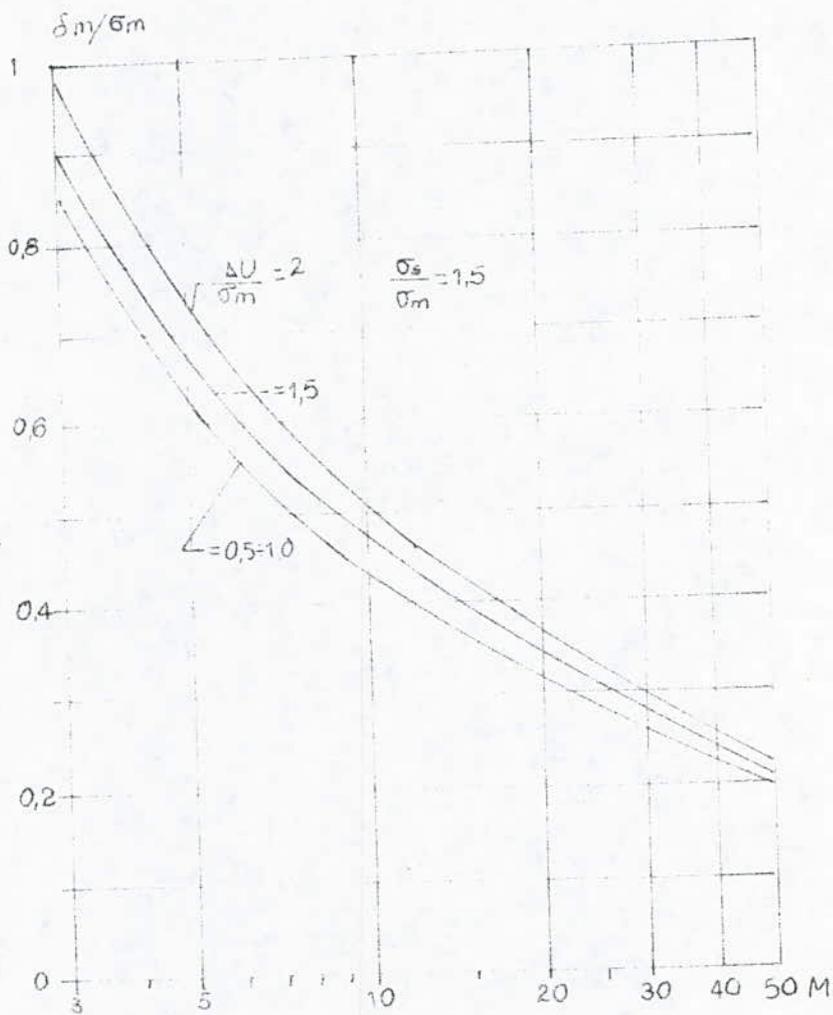
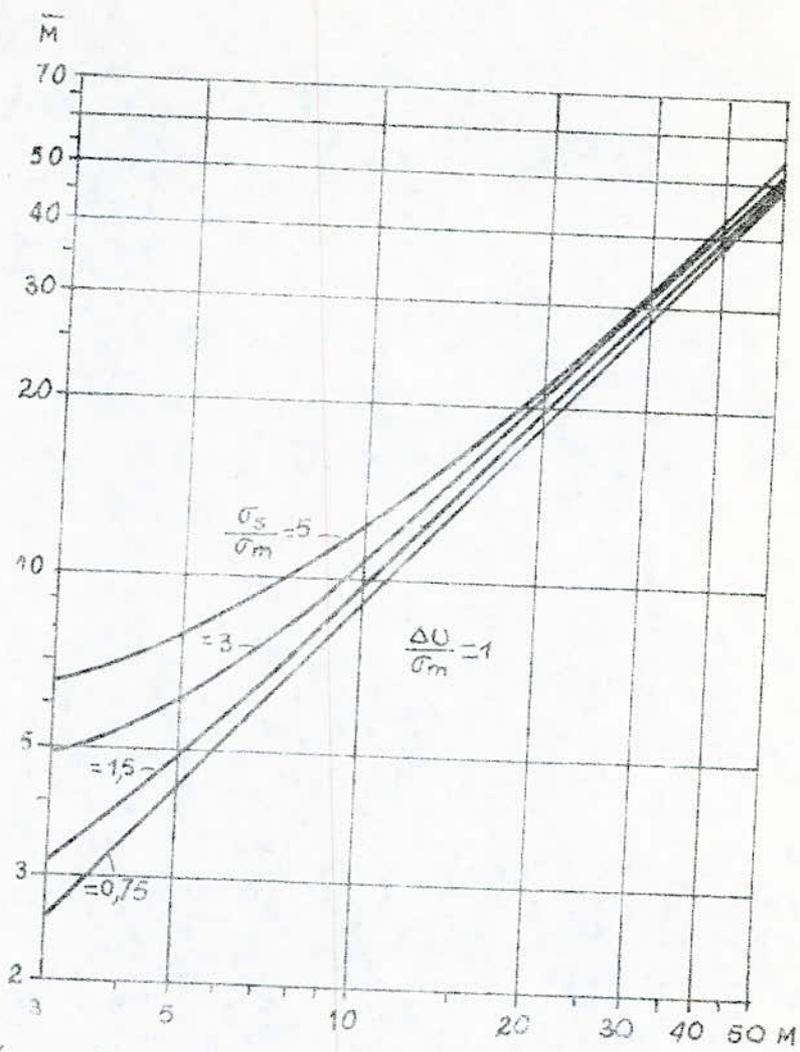


fig. variation de la précision $\delta m / \sigma_m$ en fonction du nombre M de séries aubliées, pour différentes valeurs du pas de tension $\Delta U / \sigma_m$ et pour $\sigma_s / \sigma_m = 1,5$.



Variation du nombre moyen de series d'essai \bar{M} en fonction du nombre M de series "Utiles" pour différentes valeurs de la dispersion du point de départ σ_s/σ_m , pour $U_s^* = \bar{U}_m$ et $\Delta U/\sigma_m = 1$

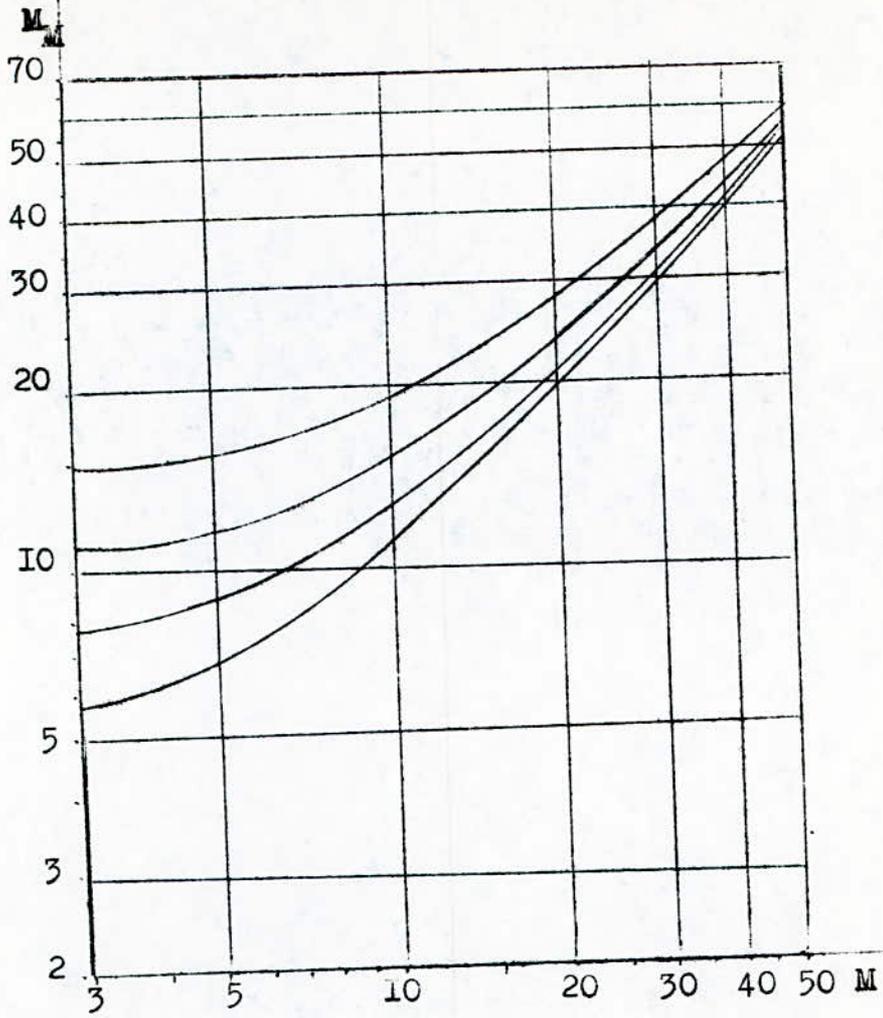
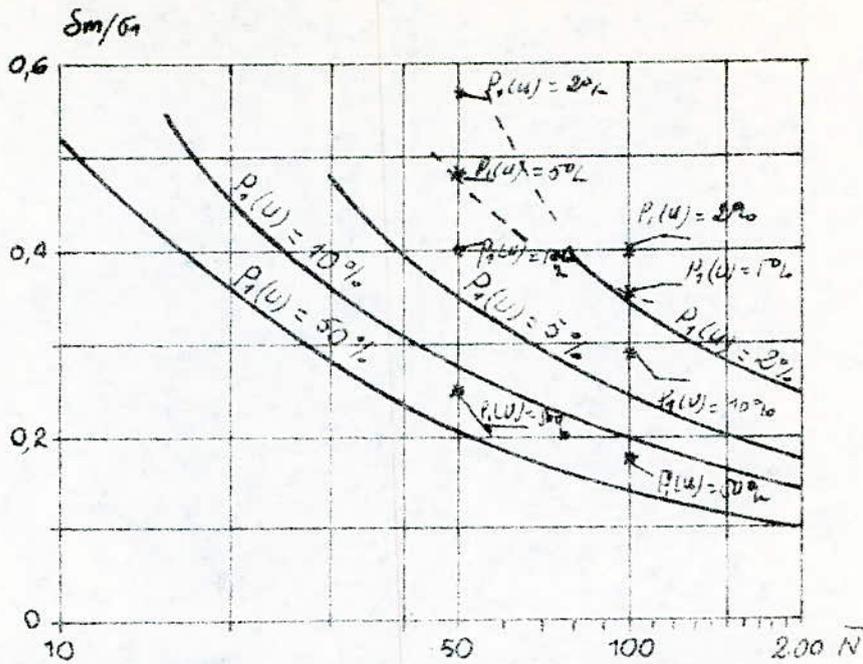


Fig - 9 -

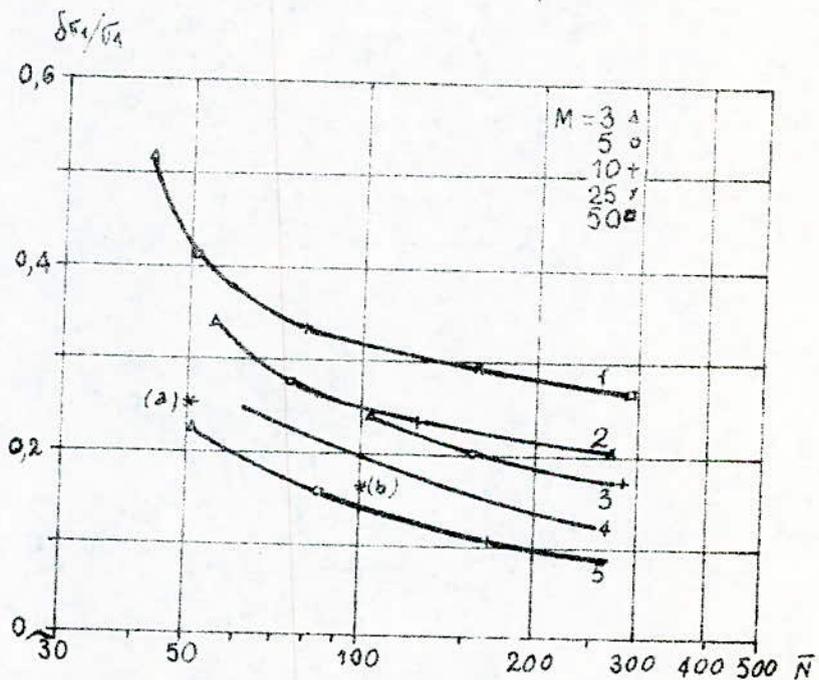
Variation du nombre maximal de séries d'essai M_M en fonction du nombre M de séries utiles pour différentes valeurs de la dispersion du point de départ σ_s/σ_m pour $U_s^* = \bar{U}_m$ et $U/\sigma_m = 1$



Precision S_m/σ_t susceptible d'être obtenue avec plusieurs méthodes d'essai en fonction du nombre moyen réel d'impulsion \bar{N} .

— méthode de montée - descente élargie

- * méthode classique avec 10 à 20 impulsions par niveau de tension.
- Δ procédure d'essai ($m=3, M=3$) + ($m=25, M=3$)



Precision S_{σ_t}/σ_t susceptible d'être obtenue avec plusieurs méthodes d'essai en fonction du nombre moyen réel d'impulsions \bar{N} .

Méthode de montée - descente

1. Tension 50% avec $M=25$ plus tension 11% ($m=6$) - avec différents M
 2. Tension 50% avec $M=25$ plus tension 5% ($m=13$) - avec différents M
 3. Tension 50% avec $M=25$ plus tension 2% ($m=34$) - avec différents M .
 4. Tension 50%.
 5. Tension 94% et tension 6% ($m=11$) avec différents M
- * (a) méthode classique avec 10 impulsions par niveau de tension.
 * (b) Méthode classique avec 20 impulsions par niveau de tension.

Les essais :

Estimation de la tension de décharge 2% :

Avec la méthode " montée descente " pour un isolateur on

a trouvé : $\bar{U}_I = 128 \pm 1$ kV

$\sigma_I = 5,9$ kV c'est-à-dire $\sigma_I = 4,6\%$ de U_I

- d'après la - fig 4 - on trouve pour la méthode " montée descente " pour $M = 40$ et $m = 1$ $\frac{\delta_I}{\sigma_I} = 0,25$ donc l'ignorance sur \bar{U}_I est :

$$2\delta_I = 2 (0,25 \cdot \sigma_I) = 2 (0,25 \cdot 4,6) = 2,3\%$$

d'où $2\delta_I = \frac{2,3 \cdot 128}{100} = 3$ kV représente la limite de confiance à 95% du résultat .

- d'après-la fig 2- : on tire la valeur de m pour une tension de probabilité 2% de décharge soit $m = 34$.

La valeur convenable du pas de tension est prise :

$$\frac{\Delta U}{\sigma_m} = \frac{\Delta U}{\sigma_{34}} = 1 .$$

- la - fig 3 - nous donne $\sigma_{34} = 0,5 \sigma_I = 0,5 \cdot 5,9 = 3$ kV
d'où $\Delta U = 3$ kV .

Le nombre de séries utiles M est limité par la valeur moyenne du nombre total d'impulsions appliquées \bar{N} en général on limite en pratique \bar{N} à 100 impulsions .

En première approximation l'ignorance du point de départ σ_s peut être prise égale à la précision sur \bar{U}_I soit $\sigma_s = \delta_I$

et comme $\frac{\delta_I}{\sigma_I} = 0,25$ d'où $\delta_I = 0,25 \sigma_I = 0,25 \cdot 4,6 = 1,15\%$

$$\frac{\delta_I}{\sigma_{34}} = \frac{\delta_I}{0,5\sigma_I} = \frac{1,15}{0,5 \cdot 4,6} = 0,5 .$$

- On a pour $\bar{N} = 100$ d'après la formule (2) :

$$\bar{N} = (\bar{M} - 0,25 (\bar{M} - I)) m \quad \text{d'où}$$

$$100 = (\bar{M} - 0,25 (\bar{M} - I)) 34 \quad \text{et on tire } \bar{M} = 4$$

d'après la figure 8 - pour $\bar{M} = 4$ on trouve $M = 5$ et le nombre réel d'impulsions $N = (\bar{M} - 0,25 (\bar{M} - I)) m$.
d'où $N = (4 - 0,25 (5 - I)) 34 = 102$ impulsions .

- d'après - fig 9 - on trouve $M_M = 6$ et $N_M = 6 \cdot 34 = 204$
Le point de départ est pris à la meilleure estimation de la tension de décharge 2% :

$$U_s = U_I - 2,05 G_I = 128 - 2,05 \cdot 9 = 116 \text{ kV}$$

L'essai est donc effectué par les données suivantes :

$$m = 34$$

$$U_s = 116 \text{ kV}$$

$$M = 5$$

$$\Delta U = 3 \text{ kV}$$

Le tableau suivant donne les résultats de l'essai :

tension appliquée	← M = 5 →					tensions utiles par niveau
I25 kV			I			I
I22 kV		0		I	I	3
II9 kV	0				0	I
II6 kV	0					

d'où la valeur estimée de la tension 2% :

$$\hat{U}_{34} = \frac{119 + 3 \cdot 122 + 125}{5} = 122 \text{ kV}$$

Estimation de G_I :

D'après la - fig 1 - pour $M = I$ on trouve :

$$\hat{U}_{34} = \hat{U}_{2\%} = \bar{U} - 2,05 G_I \quad (1)$$

$$\hat{U}_I = \hat{U}_{50\%} = \bar{U} \quad (2)$$

de (1) et (2) on trouve :

$$\hat{U}_I - \hat{U}_{34} = \bar{U} - (\bar{U} - 2,05 \hat{\sigma}_I)$$

$$\hat{U}_I - \hat{U}_{34} = 2,05 \hat{\sigma}_I$$

$$\text{d'où } \hat{\sigma}_I = \frac{\hat{U}_I - \hat{U}_{34}}{2,05} = \frac{128 - 122}{2,05} \approx 3 \text{ kV}$$

donc $\hat{\sigma}_I = 2,3 \%$ de \hat{U}_I .

d'autre par la courbe de la - fig II - nous donne pour $\bar{N} = 100$ la précision sur $\hat{\sigma}_I$ $\delta \hat{\sigma}_I = 0,25 \hat{\sigma}_I$ et la limite de confiance à 95% est $2 \delta \hat{\sigma}_I = 0,5 \hat{\sigma}_I$ en conséquence :

$$\hat{\sigma}_I = 2,3 \pm (0,5 \cdot 2,3) = 2,3 \pm 1,2 \%$$

Enfin d'après la figure 10 : on trouve sur la courbe

$P_I(U) = 2\%$ pour $N = 102$ la précision sur \bar{U}_{34} égale à :

$\delta_{34} = 0,35 \hat{\sigma}_I$ et la limite de confiance à 95% est de

$$2 \delta_{34} = 0,7 \hat{\sigma}_I = 0,7 \cdot 3 = 2 \text{ kV}$$

conclusion on trouve :

$$U_{2\%} = 122 \pm 2 \text{ kV}$$

$$\hat{\sigma} = 3 \pm 1,7 \text{ kV}$$

Avec :

U_s : niveau de tension d'essai le plus faible

M, M_m : nombre "utile" moyen et maximal de série chacune à m impulsions .

\hat{U}_I : estimation de U_I

m : nombre d'impulsions par série d'égale tension de crête U .

$P_m(U)$: probabilité pour qu'au moins une des m impulsions d'égale tension de crête et de forme donnée d'entraîner une décharge .

$\hat{\sigma}_m$: écart-type de $P_m(U)$

\bar{U}_m : tension de crête correspondant à $P_m = 50\%$

$P_I(m)$: valeur de $P_I(\bar{U}_m)$

U_m^* : valeur moyenne des estimations U_m

δ_m : écart-type de l'estimation U_m

ϵ_s : écart-type de la distribution gaussienne de tension
de départ U_s

$\hat{\sigma}_I$: estimation de l'écart-type

$\delta\hat{\sigma}_I$: écart-type des estimations $\hat{\sigma}_I$

- CONCLUSION -

On applique sur une chaîne d'isolateurs des tensions de chocs de foudre positives $1,2/50\mu s$ les différentes méthodes pour la détermination des tensions de décharge de probabilité 50% et 2% nous ont donné les résultats suivants :

Paliers Multiples	Montée descente	Montée descente élargie
I isolateur	I isolateur	I isolateur
$U_{50} = 128,2 \pm 0,8$	$U_{50} = 128 \pm 1$ kV	
$U_2 = 122 \pm 1$ kV		$U_2 = 122 \pm 2$ kV
$s = 4$ kV	$s = 3,3$ kV	$s = 3 \pm 1,5$ kV

- Pour l'estimation de la tension 50% de décharge disruptive les trois méthodes utilisées donnent des valeurs équivalentes avec une précision pratiquement la même.

La seule différence réside sur le nombre d'essai qui est plus important, mais un grand nombre d'impulsions permet à la méthode des paliers multiples d'avoir une excellente précision car la bande d'erreur pour la droite de régression se retrécit au fur et à mesure que le nombre d'impulsions s'élève.

- Pour l'estimation de la tension 2% de décharge disruptive la méthode des paliers multiples ainsi que la méthode de montée descente élargie nous donnent des valeurs équivalentes donc le choix entre les deux méthodes ne peut pas être basé sur la précision, mais sur d'autres paramètres qui sont le nombre de décharges et la valeur de la tension maximale appliquée qui sont beaucoup plus réduites dans le cas de la méthode montée descente élargie.

Tandis que la méthode montée descente ne peut pas déterminer une tension de décharge disruptive autre que celle qui correspond à la probabilité de 50%.

- Pour l'estimation de l'écart-type les trois méthodes ont une précision pratiquement la même .

La méthode des Paliers emporte l'avantage sur les autres méthodes dans le d'un très grand nombre d'applications par niveau de tension .

La méthode de montée descente élargie possède l'avantage d'obtenir un même écart-type que les autres méthodes avec une tension maximale et un nombre de décharges beaucoup plus réduit .

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	I
CHAP I / LES DECHARGES DANS L'AIR	3
I - 1 Libre parcours moyen	3
I - 2 Ionisation	4
I - 3 Ionisation	5
I - 4 Recombinaison	7
I - 5 Phénomènes superficiels	9
I - 6 Mobilité	II
I - 7 Décharges électriques dans les gaz	12
I - 8 Régidité dielectrique des gaz	19
I - 9 Régidité dielectrique de l'air aux tensions de choc	24
CHAP II / STATION D'ESSAIS DE TENSION DE CHOC	
II - 1 Description des différents équipements constituant la station d'essai de tension de choc	28
II - 2 Équipement constituant l'appareillage de mesure ...	30
II - 3 Station d'essai de tension de choc de l'E.N.P	38
CHAP III / METHODES STATISTIQUES ET ESSAIS	48
III - 1 Méthode des " PALLIERS MULTIPLES "	48
III - 2 Méthode de " MONTÉE DESCENTE "	62
III - 3 Méthode de " MONTÉE DESCENTE ÉLARGIE "	70
CONCLUSION.....	78

BIBLIOGRAPHIE

- CHAPITRE I :

- R . PAPOULAR : " Phénomènes Electriques Dans Les Gaz "
- R . ~~SEBASTIAN~~ PANSKI et autre :
" Ukxady Isolacyjne Uvradren Elektrisenergetycznych "
Praca Zbiorowa .L.N.P. Varsovie 1978 .

-CHAPITRE II :

- (I) - Bulettin de " L'Association Suisse des Electriciens "
t 60 (1969) N° 18 p 857 ... 863 .
- DOBARDZIC . M . :
" Station d'Essais Au Choc à Haute Tension "
- " Essais en Haute Tension de Choc et Méthode Des
Choix des Paramètres "
Projet De Fin d'Etude ~~de~~ promotion 1975 (Juin)
- " Mesure de la Valeur de Crête à l'Aide du Voltmètre
De Choc "
Projet De Fin d'Etude promotion 1976 .

- CHAPITRE III :

- MURRAY . R.SPIEGEL :
" Probabilités et Statistique "
- " Influence des Barrières Sur la Tension de Décharge
Disruptive des Moyens Intervalles d'Air Pointe-Plan "
Thèse de Doctorat (Varsovie 1979) - A . BOU ~~LEUR~~
- " Revue ELECTRA N°23 Année 1972 p 160 ... 175 ."