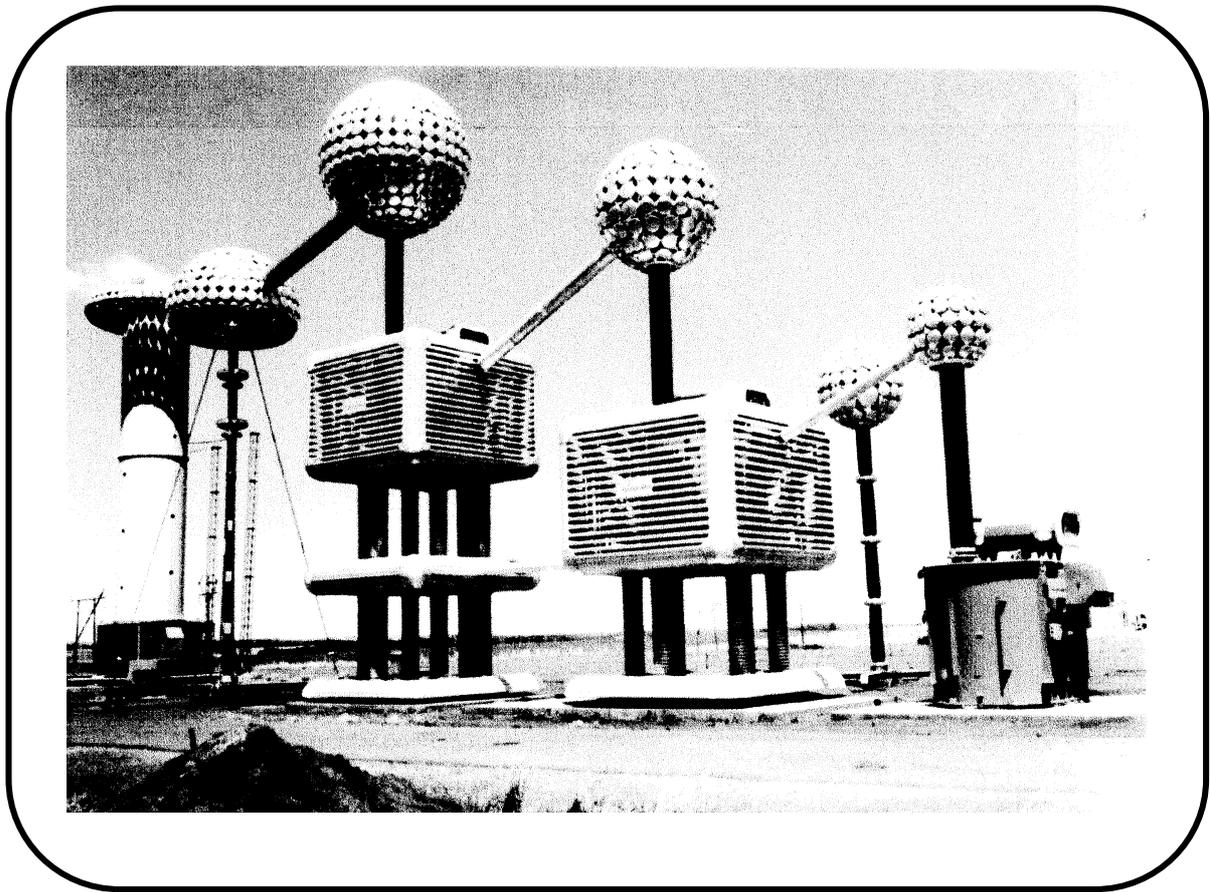


AFFOLTER Jean-François

HAUTE TENSION



Yverdon-les-Bains, octobre 2000

PLAN DU COURS HAUTE TENSION

AVANT-PROPOS.....	1
1. INTRODUCTION	2
1.1. Buts et méthodologie de la HT.....	3
2. COORDINATION DE L'ISOLEMENT.....	4
2.1. Isolation et isolants.....	4
2.2. Gradation de l'isolement.....	4
2.2.1. Tension de perforation ou de claquage	5
2.2.2. Tension de contournement, tension de cheminement.....	5
2.2.3. Tension d'essai	5
2.3. Gradation des niveaux d'isolement dans un réseau	7
3. MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES.....	8
3.1. Champ électrique et dépendance de la forme.....	8
3.2. Contrôle du champ électrique.....	15
3.3. Méthodes d'évaluation du champ électrique.....	20
4. SURTENSIONS	21
4.1 Définitions.....	21
4.2 Origine des surtensions.....	22
4.3 Propagation des ondes dans les lignes à constantes réparties	23
4.3.1 Réflexion - Réfraction.....	24
4.3.2 Détection des défauts dans les câbles.....	26
4.4 Surtensions atmosphériques.....	27
4.4.1 Nature et comportement de la foudre	27
4.4.2 Mode d'action de la foudre sur les lignes	27
4.4.3 Niveau isokéraunique.....	30
4.5 Dispositifs de protection	30
4.5.1 Définitions et caractéristiques	30
4.5.2 Aperçu historique.....	31
4.5.3 Les parafoudres courants	31
4.5.4 Emplacement des parafoudres.....	34
4.5.5 Les éclateurs	35
4.5.6 Eclateurs à tiges ou de coordination.....	36
5. ESSAIS DU MATÉRIEL HAUTE TENSION	37
5.1. Couplage pour essais sous HT alternative à 50 ou 60Hz.....	38
5.1.1 Transformateurs HT.....	38
5.1.2 Systèmes résonants	41
5.1.3 Résonance dans un circuit électrique	41
5.1.4 Résonance série.....	42
5.1.5 Schéma général	42
5.1.6 Facteur de qualité du système:	42
5.1.7 Caractéristiques d'un circuit de résonance série	42
5.1.8 Avantages et inconvénients.....	43
5.1.9 Résonance parallèle	44
5.1.10 Schéma général	44
5.1.11 Facteur de qualité du système	44
5.1.12 Caractéristique du circuit parallèle.....	44
5.1.13 Avantages et inconvénients.....	45
5.2. Essais sous haute tension continue	46
5.3. Essai spéciaux sous haute tension et haute fréquence	49
5.4. Essais de choc.....	51
5.4.1. Schéma de base.....	53
5.4.2. Schéma multiplicateur de Marx	56
5.4.3. Charge du générateur multiétage.....	57
5.4.4. Décharge du générateur de choc	57

5.5.	<i>Mesures au pont de Schering</i>	58
5.6	<i>Détection des décharges partielles dans les isolants</i>	61
5.6.1	<i>Claquage par décharge</i>	61
5.6.2	<i>Dispositif de mesure de la charge de transfert</i>	64
5.6.3	<i>Mesures</i>	65
6.	MESURE DE HAUTE TENSION EN LABORATOIRE	69
6.1.	<i>Dispositifs de mesures de valeurs de crête</i>	69
6.2.	<i>Dispositifs de mesures de tension de choc</i>	69
6.3.	<i>L'éclateur à sphères</i>	69
6.3.1.	<i>Correction de la tension disruptive mesurée</i>	70
6.3.2.	<i>Essai statistique de décharges disruptives à 50 % (pour essais de choc)</i>	71
ANNEXES	73
ANNEXE 1 :	PRINCIPE DE MESURE DE LA TENSION DE CRÊTE	74
ANNEXE 2 :	EXTRAITS DES TENSIONS D'ESSAI CEI	75
ANNEXE 3 :	ECLATEUR À SPHÈRES AVEC UNE SPHÈRE À LA TERRE	76
ANNEXE 4 :	EXTRAITS - PARAFONDRES	79
ANNEXE 5 :	RENDEMENT DU GÉNÉRATEUR DE CHOC :	80
ANNEXE 6 :	EXTRAITS DU MANUEL SCHERING-TETTEX	81
ANNEXE 7 :	ANGLE DE PERTE FONCTION DE LA FRÉQUENCE	82
ANNEXE 8 :	CARACTÉRISTIQUES DIÉLECTRIQUES DE DIFFÉRENTES MATIÈRES	83

AVANT-PROPOS

Ces notes sont le support de cours destiné aux étudiants de l'EIVD préparant le laboratoire HT. Elles sont basées principalement sur les ouvrages suivants :

- "Laboratoire à haute tension", notes de cours, C. Stähli.
- "Haute Tension", Volume XXII, EPFL, M. Aguet et M. Ianoz, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- "High Voltage Engineering", E. Kuffel et W. Zaengl, Pergamon Press.

D'autres références sont indiquées dans le texte. Ce document fait partie de la littérature du cours "Energie Electrique", comprenant aussi les fascicules suivants :

- Energétique.
- Installations BT.
- Installations HT.
- Réseaux HT.
- Protection des réseaux HT.

On y trouvera de nombreuses informations relatives et complémentaires.

Chapitre I

1. INTRODUCTION

La foudre est un phénomène HT répandu et particulièrement spectaculaire. Son interaction avec les réseaux est très importante.

L'application de la haute tension dans le grand transport d'énergie électrique est la plus courante, mais l'ingénieur électricien utilise ce savoir-faire dans de nombreux autres domaines:

Principaux domaines d'application de la haute tension { 1 }

Domaine	Application
Réseaux :	- lignes aériennes
- tension alternative	- câbles
- tension continue	- isolateurs
	- transformateurs de mesure de tension
	- transformateurs de mesure de courant
	- sectionneurs
	- disjoncteurs
	- parafoudres
	- mises à la terre
	- condensateurs
	- transformateurs de puissance
	- alternateurs
	- appareillage SF6
	- compatibilité électromagnétique (CEM)
Electricité statique	- générateurs électrostatiques
	- moteurs électrostatiques
Charge	- filtres électrostatiques
	- xérocopie
	- imprimante électrostatique
	- peinture électrostatique
décharge	- danger d'explosion et d'incendie
	- perturbations de l'électronique sensible
Physique	- microscope électronique
	- accélérateurs de particules
Médecine	- effets biologiques des champs électriques
	- diagnostique par rayons X
	- thérapie par rayons X
	- ozonothérapie
	- diélectrophorèse
	- chauffage

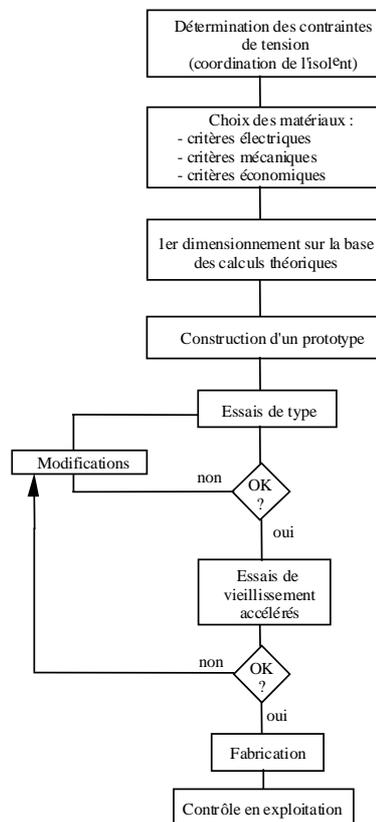
Electronique	<ul style="list-style-type: none"> - tube cathodique - générateurs piézo-électriques - allumage électrique - flash électronique - lampe à décharge - filtre bactériologique UV
Foudre	<ul style="list-style-type: none"> - captage de la foudre - protection contre la foudre (paratonnerre, éclateurs, parafoudre, câble de garde) - aviation
Impulsions électromagnétiques d'origines nucléaire (NEMP)	<ul style="list-style-type: none"> - protection des lignes de transmission - protection des antennes - protection des appareils électroniques - cages blindées

1.1. Buts et méthodologie de la HT

L'ingénieur devra maîtriser ce système physique, de manière à concevoir des appareils résistant aux contraintes subies lors de son utilisation en HT.

Il peut s'appuyer sur des simulateurs, par ex. les calculs au moyen des "éléments finis", mais, dans ce domaine, l'approche expérimentale reste importante.

La méthodologie de construction est souvent la suivante (fig.1.1):



Chapitre II

2. COORDINATION DE L'ISOLEMENT

Les appareillages des postes et des réseaux de distribution à haute tension sont soumis en exploitation à des surtensions d'origine atmosphérique ou de service provenant de manœuvres, de mises à la terre, de courts-circuits ou d'autres incidents conduisant à des phénomènes transitoires.

On entend par **coordination de l'isolement**, l'ensemble des mesures qui sont prises pour éviter des décharges disruptives de perforation ou de contournement dans le matériel des installations.

Ces conditions sont obtenues en respectant des tensions de tenue minimales pour les diverses parties des installations. Il s'est donc avéré nécessaire de fixer des règles internationales et nationales (Commission Electrotechnique Internationale - CEI - et Association Suisse des Electriciens - ASE -). Ces règles définissent d'une part les tensions d'essais du matériel électrique et, d'autre part, les conditions dans lesquelles ces essais doivent être effectués. Par une gradation des tensions d'essai, on obtient ainsi une coordination de l'isolement correcte.

2.1. Isolation et isolants

Les systèmes d'isolation peuvent être composés des **trois** états de la matière : **solide, liquide et gazeux**. Les caractéristiques diélectriques doivent répondre aux sollicitations maximales, à long terme. La valeur du champ maximum juste avant un claquage définit la **rigidité diélectrique** d'un matériau (voir annexe 8). **Cette valeur est différente pour les ondes de choc et les ondes alternatives.**

2.2. Gradation de l'isolement

Les appareils dont la coordination de l'isolement est correcte, présentent les niveaux de tension de la figure 2.2-1.

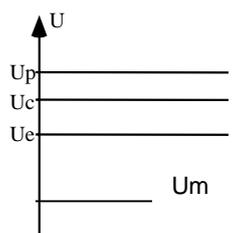


fig. 2.2-1

- Tension de perforation U_p (isolation interne)
- Tension de contournement U_c (isolation externe)
- Tension d'essai fixée par les règles de coordination des isolements U_e (prescriptions CEI ou ASE).

2.2.1. Tension de perforation ou de claquage

La tension de perforation ou de claquage est celle qui conduit à la perforation ou percement de l'isolation interne. Décharge complète et destructive au travers de l'isolant. Cette tension doit être évidemment plus grande que la tension de contournement de l'appareil.

2.2.2. Tension de contournement, tension de cheminement

La tension de contournement est la tension disruptive, qui produit une décharge dans l'air, le long de l'isolation externe de l'appareil. Cette tension doit être plus élevée que la tension d'essai. En effet, selon les règles précitées, l'appareil soumis à la tension d'essai ne doit présenter aucun contournement au cours des essais.

2.2.3. Tension d'essai

La tension d'essai ou de tenue est fixée par les règles nationales ou internationales et permet une coordination correcte de l'isolement.

Exemple d'essai au choc d'un isolateur en résine Epoxy

Tension nominale la plus élevée 24 KV efficace.

Tension d'essai 125 KV, onde 1.2 / 50 μ s.

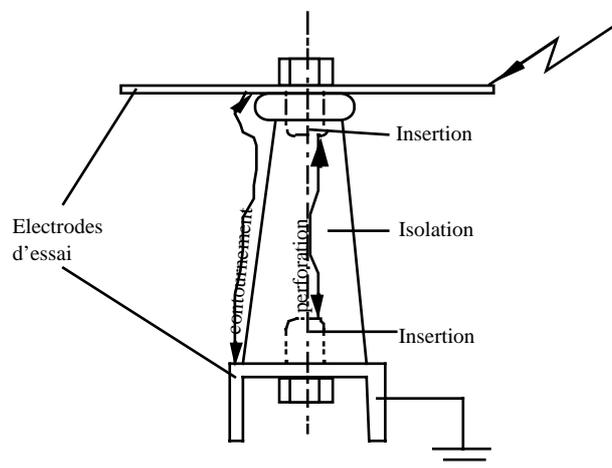


fig. 2.2-2

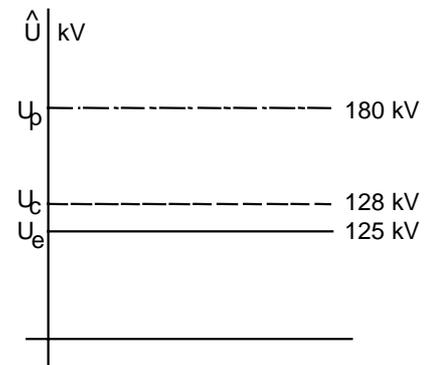


fig. 2.2-3

Pour déterminer la tension de perforation de l'isolateur, il faut immerger ce dernier dans de l'huile ou dans du gaz sous pression (par exemple N_2 , SF_6).

Les pages en annexe 2 donnent les caractéristiques des bornes de traversées types condensateurs.

Quelques définitions complémentaires à celles des paragraphes 2.2.1 à 2.2.3.

On appelle **tension de tenue à fréquence industrielle** la valeur efficace la plus élevée de la tension à la fréquence de service que le matériel doit supporter pendant une minute entre sa partie active et la masse, sans qu'il ne se produise de décharge disruptive de perforation ou de contournement.

On appelle tension de **tenue au choc** la valeur de crête de la tension de choc en onde pleine de forme normalisée que le matériel doit supporter dans des conditions spécifiées.

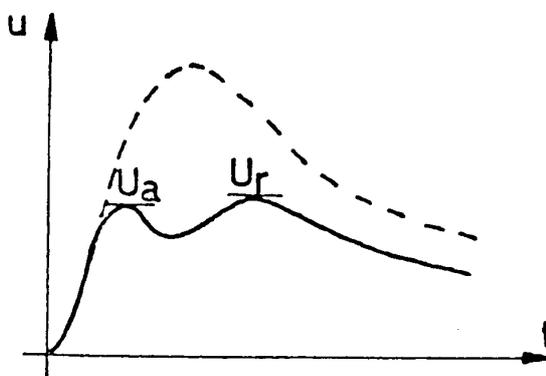
Le niveau d'isolement d'un matériel donné est défini par les valeurs de tenue à fréquence industrielle et de tenue au choc.

Le niveau de protection au choc d'un dispositif de protection est la valeur de crête la plus élevée de la tension qui peut exister entre ses bornes lors de l'application d'une onde de choc normalisée. Pour un parafoudre à résistance variable, ce sera la tension résiduelle correspondant à l'intensité de décharge la plus élevée à laquelle on puisse s'attendre. Il est clair qu'il faudra veiller à ce qu'une relation convenable existe entre ce niveau de protection et le niveau d'isolement du matériel. Roth [3] recommande un niveau de protection d'environ 25% au-dessous du niveau d'isolement.

La figure 2.2-4 représente la courbe $u = f(t)$ d'un parafoudre pour un front d'onde donné. On appelle **tension résiduelle** U_r sous l'effet d'un courant de décharge, la valeur du plafond de tension établi par le parafoudre, découlant du dimensionnement et des propriétés de la résistance variable.

Siemens mentionne par exemple, pour un parafoudre destiné à un réseau de 30 KV

pour une intensité de 1 kA	$U_r = 93 \text{ kV}$
pour une intensité de 5 kA	$U_r = 114 \text{ kV}$
pour une intensité de 10 kA	$U_r = 122 \text{ kV}$
pour une intensité de 65 kA	$U_r = 135 \text{ kV}$



Ainsi, le parafoudre soumis à une onde incidente (courbe en traitillés) fig. 2.2-4. établira à ses bornes une tension, qui évoluera selon la courbe en trait plein. U_a (tension d'amorçage) et U_r peuvent se situer à des niveaux assez différents, car U_a dépend de la raideur du front de l'onde et U_r du courant de décharge.

fig. 2.2-4.

2.3. Gradation des niveaux d'isolement dans un réseau

Il est pratiquement impossible, pour des raisons économiques d'isoler, parfaitement un réseau. Des surtensions très fortes créeront ainsi des perturbations, d'où les dispositions suivantes :

- Limiter l'importance de ces perturbations, si possible pas d'interruption de service.
- Limiter les dégâts à des parties secondaires facilement accessibles et remplaçables.
- Les lignes, étant peu accessibles, seront bien isolées. Dès 30 kV, fil de garde.
- Les sous-stations étant bien surveillées, les surtensions peuvent être bien contrôlées.

De ces principes, on comprend que la gradation des niveaux d'isolement des diverses parties est indispensable.

L'exemple suivant illustre bien ce problème :

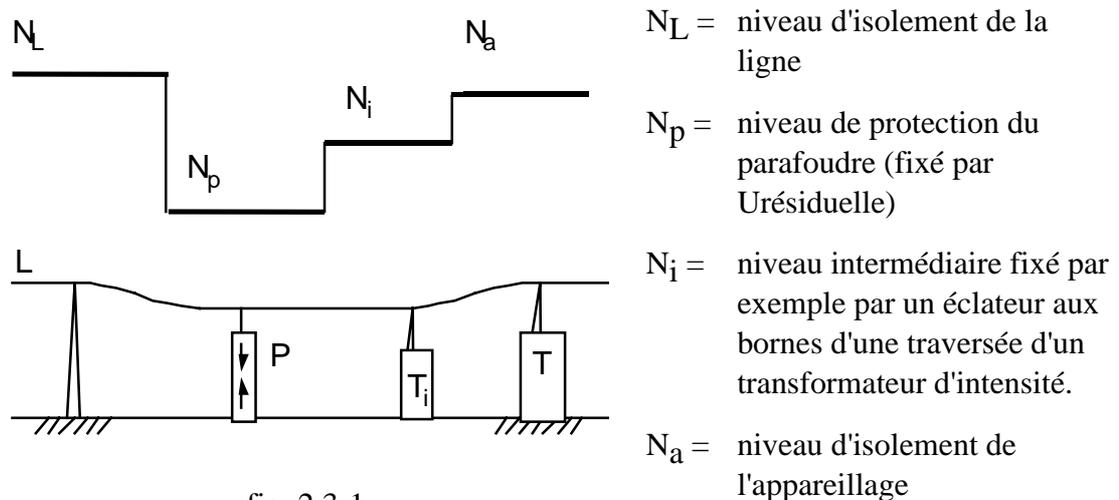


fig. 2.3-1.

Exemple de tensions d'essais pour le matériel de poste selon la CEI ou l'ASE

Tension de service la plus élevée U_m kV eff.	Tension d'essai à fréquence industrielle à 50 Hz		Tension d'essai au choc Onde 1,2/50 μ s kV (crête)
	Matériel poste kV eff.	Transfo et C en kV eff.	
12	35	28	75
24	55	50	125
72.5	140	140	325
245	460	460	1050

Comparer les valeurs du tableau à celles des pages des annexes 2, 3 et 4

chapitre III

3. MAITRISE DES CHAMPS ELECTRIQUES

L'étude des champs électriques est importante dans l'engineering haute tension. En effet, plus la tension est élevée, plus les distances d'isolation nécessaires sont importantes et le matériel encombrant, donc cher ! Il faut utiliser au mieux les systèmes d'isolation afin de réduire la taille des appareils, mais sans pour autant en diminuer la qualité. Un champ trop élevé signifie inéluctablement une durée de vie courte et un manque de fiabilité.

3.1. Champ électrique et dépendance de la forme

Pour les détails, on se référera au cours d'électrostatique. Seules les notions utiles sont rappelées. En particulier, la loi de la circulation du champ électrique indique :

$$\vec{E} \cdot d\vec{l} = -dU$$

où E = champ électrique; U = potentiel; l = distance.

Entre deux électrodes parallèles, le champ E est donc égal à :

$$E = -\frac{U}{d}$$

où U = différence de potentiel entre les électrodes; d = distance entre les électrodes.

Chaque matériau admet un champ disruptif maximum dont le dépassement provoque un claquage (valeurs, voir tableaux dans l'annexe 8).

On se souviendra aussi de la loi de la conservation des charges, ainsi que de celle du déplacement électrique D :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \vec{E}$$

où ε_0 = permittivité du vide = $8,854 \cdot 10^{-12}$ [F/m]; ε_r = perm. rel. du matériau.

Le théorème de Gauss est ainsi souvent nécessaire; il exprime le fait que le flux total du déplacement électrique à travers une surface fermée, est égal à la charge totale contenue à l'intérieur du volume considéré :

$$\oiint_S \vec{D} dS = \iiint_V \delta_{ch} \cdot dv = \sum_V q$$

où δ_{ch} = densité de charge dans le volume v [C/m^3]

Appliquées aux formes courantes en HT, ces lois aboutissent aux formules suivantes :

- pour l'extérieur d'un conducteur :

$$E(r) = \frac{q/\ell}{2\pi r \epsilon}$$

- pour l'extérieur d'une sphère :

$$E(r) = \frac{q}{r^2 4\pi \epsilon}$$

En appliquant la loi de la circulation du champ au long d'un rayon, on obtient pour le conducteur :

$$\vec{E}(r) \cdot \vec{dr} = - dU \quad \text{donc} \quad dU = -\frac{q/\ell}{2\pi \epsilon} \cdot \frac{dr}{r}$$

On obtient en intégrant :

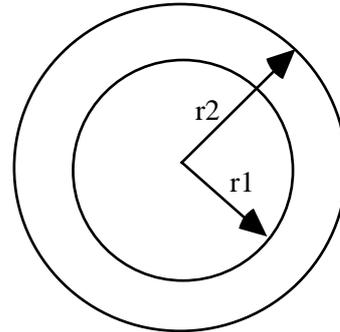
$$U = K + \frac{q/\ell}{2\pi \epsilon} \ln r$$

Pour un conducteur coaxial (par ex. un câble), on peut tenir le même raisonnement que pour le conducteur extérieur. La différence de potentiel devient donc $U_{ext} - U_{int}$, les constantes d'intégration "K" s'annulent et on obtient :

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}$$

ou pour des sphères coaxiales

$$E(r) = \frac{U}{r^2 \frac{r_2 - r_1}{r_2 \cdot r_1}}$$



Remarques importantes:

- On remarque dans les formules ci-dessus que, pour une tension fixée, le champ \vec{E} augmentera d'autant plus que le rayon diminue ! Ceci explique qu'en HT tous les appareils ont de grands rayons et sont munis d'anneaux de répartition de champ. Des rayons sous dimensionnés provoquent **l'effet couronne**, avec toutes ses conséquences (bruit, perturbations radio...).

- En vertu des mêmes lois, le champ E est nul à l'intérieur des conducteurs. Cette propriété permet la construction des cages de Faraday, écrans électriques. Pour l'atténuation de larges gammes de fréquences, une chambre blindée est nécessaire.

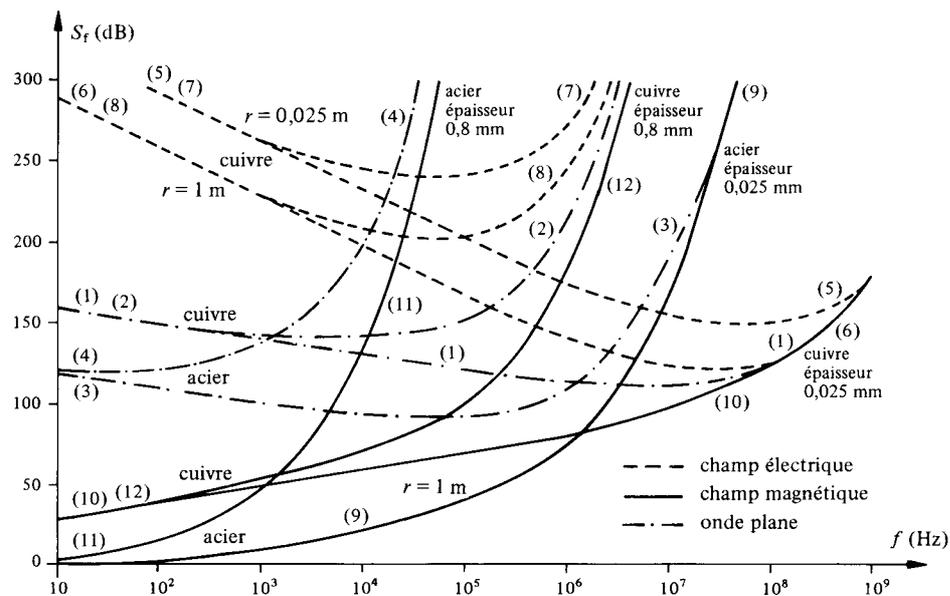


fig. 3.1-1 Atténuation de blindages, en fonction de la fréquence pour les champs électrique, magnétique et l'onde plane, r , distance source-blindage { 1 }

- Dû à la structure de la matière (dipôles), **les champs maximaux admissibles ne sont pas les mêmes s'il s'agit de contraintes continues, alternatives ou de choc positives ou de choc négatives !**

Facteur de forme (de Schwaiger)

Comme on l'a vu, le champ dépend de la forme et de la tension. Pour l'étude des champs, on définit un facteur liant champ et tension pour certaines électrodes, en fonction de la distance les séparant.

$$\eta = \frac{U}{E_{\max} \cdot d}$$

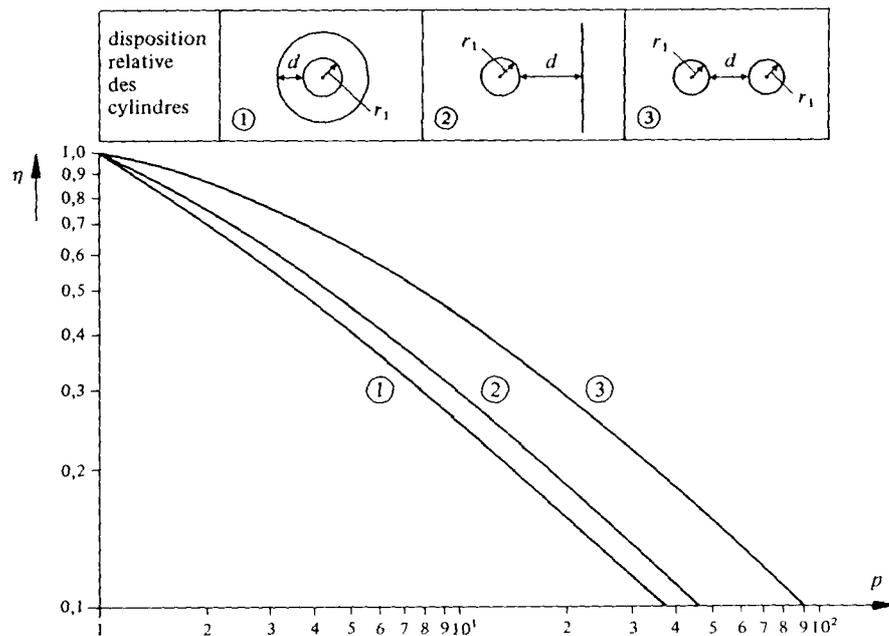


fig. 3.1-2. Facteur de Schwaiger pour des configurations cylindriques
avec $p \leq 10^2$, $p = (d + r_1) / r_1 \{1\}$

On définit également parfois un facteur d'intervalle, qui tient compte de la forme des électrodes pour le calcul de la tension disruptive.

Effet Couronne (ou Corona) pour les conducteurs aériens

Lorsque les rayons des conducteurs sont mal dimensionnés, le champ disruptif de l'air est dépassé. L'effet Corona se produit, générant de la lumière (arcs = UV), du bruit, des perturbations radiophoniques, de l'ozone et des pertes électriques. Il est donc impératif de l'éviter.

Champ électrique entre conducteurs :

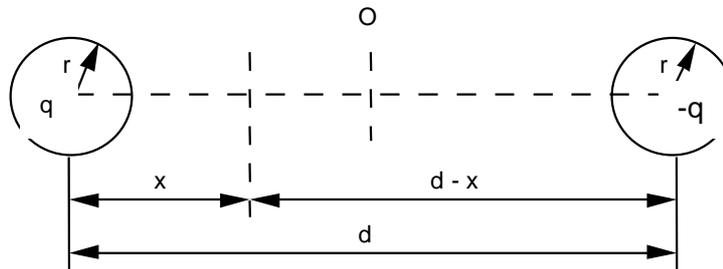


fig. 3.1-3. Deux conducteurs aériens

Le champ électrique entre 2 conducteurs est donné par :

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\frac{q}{x} - \frac{q}{d-x} \right]$$

On en tire le potentiel en intégrant par rapport à x :

$$U_c = \frac{q}{2\pi\epsilon} \left[\int_r^{d-r} \frac{1}{x} dx + \int_r^{d-r} \frac{1}{d-x} dx \right] \cong \frac{q}{\pi\epsilon} \ln \frac{d}{r} \quad (d \gg r)$$

d'où on tire :

$$q = \frac{\pi \epsilon U}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)}$$

Le champ maximum sera à la périphérie du conducteur et le champ minimum à l'entraxe; Pour le champ max., on peut écrire :

$$E_{\max} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\frac{q}{r} - \frac{q}{d-r} \right]$$

et comme $d \gg r$:

$$E_{\max} \cong \frac{q}{2\pi\epsilon r}$$

où on remplace q pour obtenir :

$$E_{\max} \cong \frac{U_c}{2r \ln\left(\frac{d}{r}\right)}$$

On a considéré ci-dessus un système biphasé avec une tension U_c entre conducteur $U_c = 2 U_s$, donc si l'on exprime la formule ci-dessus par rapport à la tension simple, on obtient :

$$E_{\max} \cong \frac{U_s}{r \ln\left(\frac{d}{r}\right)}$$

formule valable aussi en triphasé. On remarquera que ce champ maximum se trouve sur l'axe entre conducteurs.

Décharges Corona

Lorsque le champ disruptif est dépassé, le claquage de l'air environnant se produit; il devient conducteur et le diamètre du conducteur devient ainsi plus grand... ce qui paradoxalement réduit le champ maximum.

Tension critique¹

Calculons la tension maximum applicable à un conducteur, sans que l'effet corona n'apparaisse; la tension disruptive de l'air E_0 est de $3k\hat{V} / \max$ ou $2,1 \text{ kV}_{\text{eff}}/\max$ aux conditions de pression et de températures normalisées (20° et 760 mm Hg , voir § 6.3.1). Le champ disruptif peut être corrigé en fonction de conditions atmosphériques différentes au moyen de la densité relative de l'air :

$$k = 0,386 \frac{b}{T}$$

$b = \text{pression atm. en mmHg}$
 $T = 273^\circ\text{C} + \text{température ambiante } ^\circ\text{C}$

Il faut aussi tenir compte de l'état de surface du conducteur; pour cela on inclut un facteur de surface expérimental m valant :

Conducteur	facteur de surface m
lisse et neuf	1
lisse, oxydé	0,93 - 0,98
toronné	0,72 - 0,9 par défaut : 0,85

¹ Ref. : « l'effet couronne en tension alternative », G. Gary, M. Moreau, Eyrolles 1976

Des expressions obtenues précédemment et en incluant les facteurs nécessaires, on obtient la tension critique (tension simple) :

$$U_{\text{crit.}} = m \cdot k \cdot E_{\text{oeff}} \cdot r \cdot \ln\left(\frac{d}{r}\right)$$

L'effet visuel apparaît à une tension (simple) légèrement supérieure, qui peut être calculée avec la formule semi-empirique de Peek :

$$U_{\text{visu}} = E_{\text{oeff}} \cdot m \cdot k \cdot r \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{k \cdot r}}\right) \cdot \ln\left(\frac{d}{r}\right)$$

Pertes Corona

On calcule aussi les pertes avec deux formules semi-empiriques; lorsque le rapport $\frac{U_s}{U_{s \text{ crit.}}} > 1,8$ on utilisera la formule de Peek; (U signifie $U_{s \text{ eff}}$ [kV] et f = fréquence [Hz])

$$P_c = 224(f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{d}} \cdot (U - U_{\text{crit.}}) \cdot 10^{-5} \quad [\text{kW} / \text{phase} / \text{km}]$$

et si $\frac{U_s}{U_{s \text{ crit.}}} < 1,8$ formule de Peterson donne de bons résultats :

$$P_c = \frac{21 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot U^2}{\left(\log_{10}\left(\frac{d}{r}\right)\right)^2} \cdot F \quad [\text{kW}/\text{phase}/\text{km}]$$

avec le facteur F variant avec le rapport $\frac{U_s}{U_{s \text{ crit.}}}$

$\frac{U_s}{U_{s \text{ crit.}}}$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
F	0,012	0,018	0,05	0,08	0,3	1,0	3,5	6,0	8,2

Ces pertes sont par contre appréciables pour amortir la propagation des ondes de foudre.

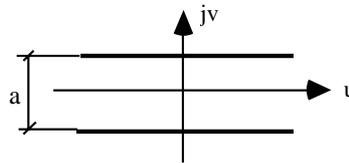
3.2. Contrôle du champ électrique

Augmenter l'épaisseur d'isolant n'est souvent pas souhaitable. On choisira donc un dimensionnement astucieux, utilisant des formes et matériaux adéquats.

Profil de Rogowski

Si le champ est perpendiculaire et uniforme entre deux plaques, ce n'est plus le cas dans les bords. On peut s'affranchir de ce problème en utilisant le profil que Rogowski obtient au moyen de la transformation conforme suivante :

Plan complexe $w = u + jv$



On admet que le champ est uniforme dans le plan w , puis on transforme tous les points dans le plan $z = x + jy$ au moyen de la formule suivante :

$$z = \frac{a}{\pi} (w + 1 + e^w)$$

En séparant les parties réelles et imaginaires, on obtient :

$$x = \frac{a}{\pi} (u + 1 + e^u \cos v)$$

$$y = \frac{a}{\pi} (v + e^u \sin v)$$

Le résultat apparaît ainsi :

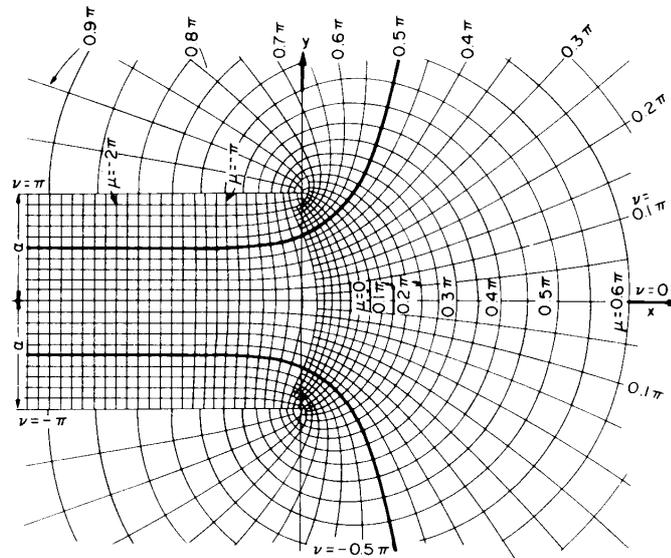


fig. 3.2-1 Transformation d'un champ uniforme dans le plan w en un champ dans le plan z : Profil de Rogowski ($v = \pm \frac{\pi}{2}$)

On constate que le champ décroît régulièrement dans les bords. La forme peut changer dès que le champ atteint des valeurs suffisamment faibles.

Ce profil est utilisé pour les plaques d'essai des isolants et les écrans, entre autres.

Utilisation de diélectriques composites

L'utilisation de diélectriques différents est souvent nécessaire pour des raisons constructives mécaniques.

Par exemple papier + presspan + huile dans les transformateurs. L'utilisation de diélectriques d' ϵ différents peut s'avérer utile pour la répartition du champ, mais peut aussi s'avérer très dangereuse si mal contrôlée ou si c'est un résultat involontaire (par ex. une bulle dans l'isolant ou une couche d'air entre des isolants sandwich...).

Répartition du champ

Admettons une région composée de deux diélectriques soumis à un champ uniforme.

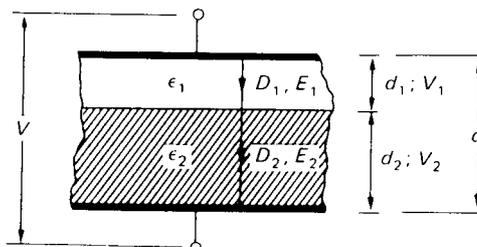


fig. 3.2-2 Deux diélectriques dans un champ uniforme

Cette configuration représente deux capacités en série dont les caractéristiques diffèrent d' ϵ_1 , d_1 et ϵ_2 , d_2 . Le déplacement électrique $D = \epsilon E$ est identique pour les deux couches. On en déduit :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

D'autre part, la différence de potentiel aux bornes du système est :

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2$$

En remplaçant, on peut en déduire les valeurs de chaque champ par rapport à la tension totale et des ϵ et d :

$$E_1 = \frac{U}{\epsilon_1 \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)} = U \cdot \frac{1}{d_1 + d_2 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)}$$

$$E_2 = \frac{U}{\epsilon_2 \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)} = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d} \cdot \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1}$$

Le dénominateur représente une distance équivalente.

L'influence des différents paramètres peut être examinée et la conclusion la plus importante est la suivante; plus une couche devient fine et que son ϵ_r devient faible, plus le champ dans cette couche devient important.

C'est par exemple le cas d'une couche d'air entre conducteur et isolant ou, pour un câble, entre l'isolant et la gaine métallique, ou encore une couche d'air dans un connecteur HT. Ces configurations sont évidemment à proscrire.

En respectant cependant quelques conditions d'épaisseur et d' ϵ pas trop différents, on trouve une utilisation intéressante de ce procédé dans les câbles, leurs extrémités et jonctions, dans les bornes de traversées et les capacités;

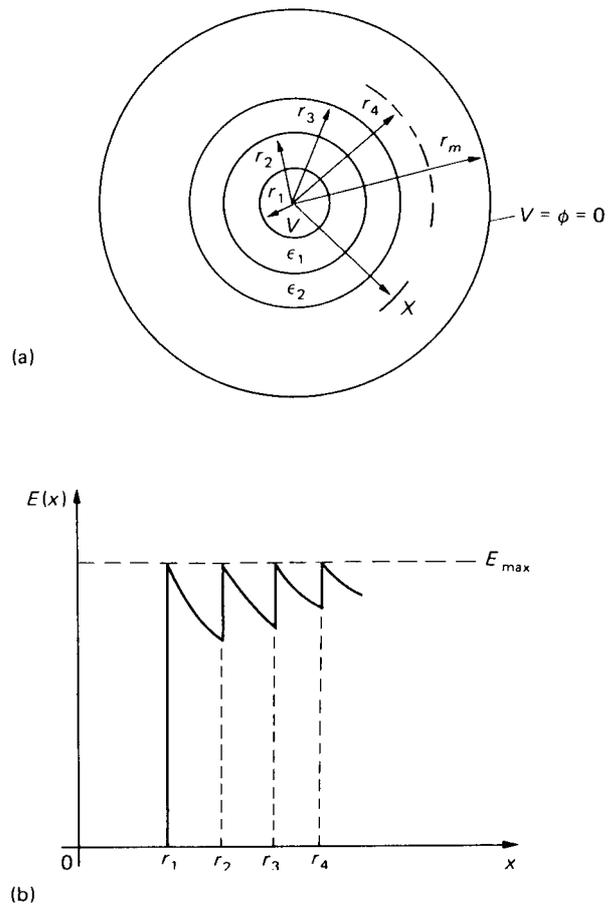


fig. 3.2-3 Câble coaxial avec couches de différentes permittivités. (a) Geometrie. (b) Répartition du champ pour $\epsilon_1 r_1 = \epsilon_2 r_2 = \dots \epsilon_n r_n = \text{const.}$

En appliquant la loi de Gauss, on déduit le champ dans les couches :

$$E(x) = \frac{U}{\epsilon_x \cdot x \sum_{n=1}^m \frac{1}{\epsilon_n} \ln \left(\frac{r_{n+1}}{r_n} \right)}$$

Dans le cas illustré, on conserve E_{\max} en gardant constant les multiples $\epsilon_n r_n$. Ceci permet de réduire le diamètre de l'objet, mais implique l'utilisation d'isolants supportant tous E_{\max} .

La réfraction diélectrique

Lorsque le déplacement électrique D rencontre la surface d'un isolant d' ϵ différent et qui n'est pas perpendiculaire, la direction de ce vecteur va changer. Les angles d'incidence et de réfraction obéissent à la relation suivante :

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

L'effet est illustré sur la figure suivante :

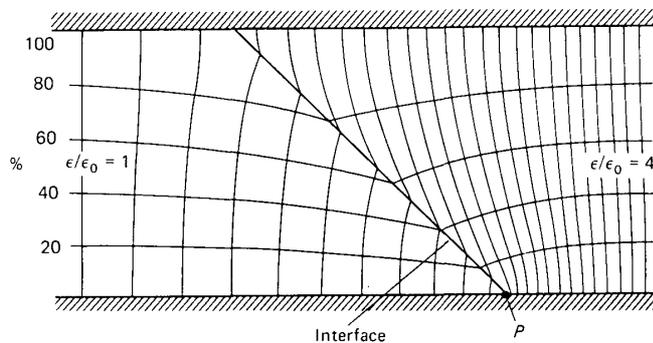


fig. 3.2-4 Deux diélectriques différents entre des électrodes planes

Ceci peut conduire à quelques difficultés, par exemple lors de l'essai diélectrique des matériaux.

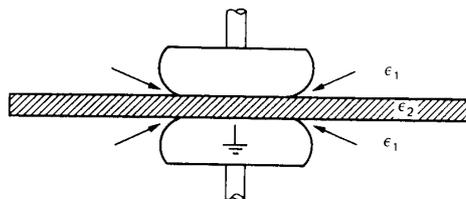


fig. 3.2-5 Essai de claquage sur une plaque (ϵ_2) : endroits où le champ est maximum pour $\epsilon_1 < \epsilon_2$

Pour éviter ceci, ϵ_1 doit être augmenté, en utilisant par exemple du SF6 ou de l'huile.

On utilise cependant favorablement ce phénomène, par exemple dans les extrémités de câbles ou dans le dimensionnement des isolateurs placés à l'intérieur des installations SF6.

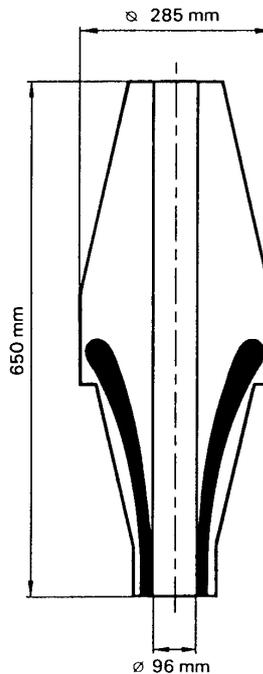


figure : 3.2-6 Déflecteur d'extrémité de câble HT

3.3. Méthodes d'évaluation du champ électrique

Disons d'emblée que l'ordinateur permet, grâce à l'application de méthodes numériques, la résolution efficace des problèmes de champs. Citons cependant pour mémoire les autres méthodes existantes :

Méthodes expérimentales

Au moyen d'un voltmètre électrostatique (sondes de champ), promené aux alentours de l'objet sous tension. L'objet doit évidemment être déjà fabriqué. Cette méthode est cependant utilisée pour des vérifications dans le contexte réel. Il faut prendre garde à ce que la mesure ne déforme pas le champ.

Méthodes analogiques

Les plus connues sont :

- Les méthodes graphiques, par lesquelles on trace un ensemble de lignes orthogonales.
- La cuve électrolytique; des électrodes ayant la forme de l'objet sont immergées dans un liquide semi-conducteur. L'objet est mis sous tension ($\leq 50V$), la cuve à la terre et les champs sont relevés au moyen de sondes.

- Les réseaux d'impédances dans lesquels le "fluide de la cuve rétrostatique" est remplacé par un réseau de résistances; ces tensions sont mesurables aux noeuds.

Méthodes analytiques et numériques

- Transformations conformes; méthodes utilisant des passages d'un plan complexe, dans lequel les champs sont simples, à un autre plan complexe représentant les champs réels. (Voir l'exemple du profil de Rogowski). Les formules de passage sont difficiles à trouver.
- Principe des charges fictives, basé sur la simulation de la distribution superficielle de charges électriques à la surface des électrodes. La résolution implique le calcul de coefficients de potentiel, donc ici également calculs matriciels.
- Différence finie; méthode numérique basée sur la dérivée du potentiel. Le système d'équation résultant est traité sous forme matricielle. Cette méthode n'est pas pratique ou peu précise lorsque les champs ne sont pas homogènes.
- Eléments finis. Parente proche de la différence finie, cette méthode consiste à "minimiser l'énergie" dans la région d'intérêt. Celle-ci est découpée en petits éléments (triangles, rectangles, ...) dans chacun duquel on admet une variation linéaire ou quadratique du champ, ce qui permet un résolution matricielle simple. Pour une bonne précision, il est cependant nécessaire de diviser une région comportant de grandes variations de champ en de plus nombreux éléments.

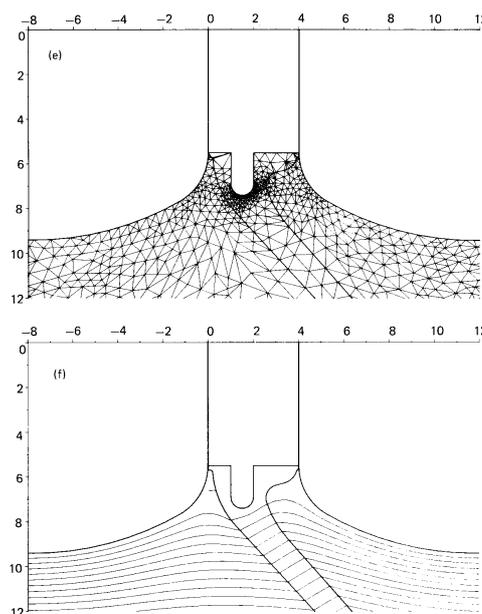


fig. 3.3-1 a) Découpage en éléments triangulaires et b) résultat

Cette méthode est très utilisée, car les mêmes algorithmes sont valables pour toutes sortes de champs (magnétiques, thermiques, ...).

Chapitre IV

4. SURTENSIONS

4.1 Définitions

On désigne par **surtension** toute différence de potentiel anormale apparaissant dans les circuits électriques et qui est susceptible d'endommager les éléments de ces circuits (lignes, machines, etc...).

On distingue deux sortes de surtensions :

transversales apparaissant entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs,

longitudinales ou entre spires, correspondant à un accroissement exagéré de la différence de potentiel entre deux points voisins d'un même conducteur.

Elles peuvent exister simultanément ou isolément.

L'étude des surtensions peut être abordée de manière différente selon leur spectre de fréquence. Un phénomène électrique ou électromagnétique n'est jamais instantané : il doit se **propager**. Sa **vitesse de propagation** peut être très grande, mais pas infinie.

En pratique, le phénomène pourra être considéré comme instantané si sa **longueur d'onde** est beaucoup plus grande que les dimensions du système considéré.

Exemple : pour une ligne de 100 km, un phénomène à 50 Hz

$$\lambda = c_0 \cdot \frac{1}{f} = 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{50} = 6000 \text{ km}$$

peut être considéré comme instantané ; par contre pour un phénomène à 10 kHz ($\lambda = 30 \text{ km}$), il faudrait tenir compte de sa propagation.

4.2 Origine des surtensions

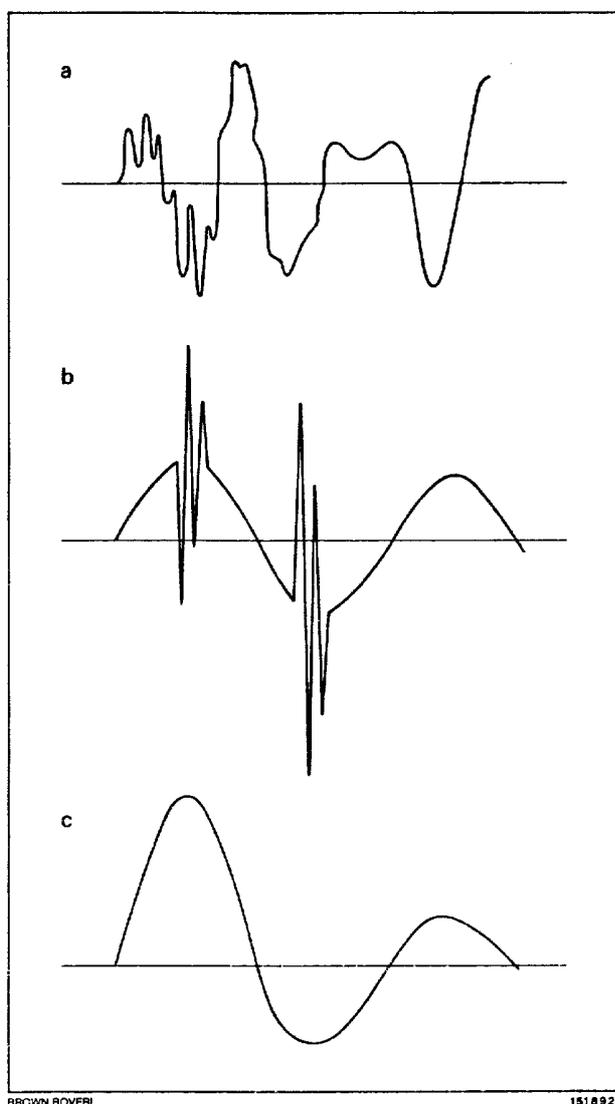
Les surtensions peuvent avoir trois origines :

atmosphériques

manœuvres sur le réseau (phénomènes transitoires)

surtensions à la fréquence de service dues au déclenchement de charges ou aux lignes à vide.

Exemples de surtensions :



Pour éviter que les surtensions n'aient des suites catastrophiques sur les appareils, on construit ceux-ci de façon à ce qu'ils résistent à des surtensions à la fréquence nominale pendant 1 min et à des chocs normalisés. Pour éviter que la tension n'atteigne ces valeurs, on installera à l'entrée des postes de couplage des parafoudres qui s'amorcent à une tension définie et écoulent ces surtensions à la terre, puis interrompent le courant qui les traverse.

Quelques formes possibles de la surtension de manœuvre

- a: Enclenchement d'une ligne à vide
- b: Réamorçages après déclenchement d'une ligne à vide
- c: Oscillation de déclenchement amortie

4.3 Propagation des ondes dans les lignes à constantes réparties¹

La théorie fait partie du cours de physique; aussi nous bornerons-nous aux cas particuliers qui nous intéressent.

Les équations différentielles de la tension et du courant sont (d'après la règle de Kirschoff et des noeuds) :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = -R'i - L' \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = -G'u - C' \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases}$$

où R' = résistance ohmique (Ω/m)

L' = inductance (H/m)

C' = capacité (F/m)

G' = conductance transversale (S/m)

d'où l'on déduit l'équation commune à u et i

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R'G'u + (R'C' + L'G') \frac{\partial u}{\partial t} + L'C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

L'étude de la solution générale est assez complexe ; dans le cas où l'on a affaire à des ondes de haute fréquence, on peut admettre que les paramètres R et G ont peu d'influence, face à L et C . En posant

$$R = G = 0$$

ce qui revient à admettre que la ligne est sans pertes, c'est-à-dire que l'amortissement du phénomène est nul (il n'est d'ailleurs pas considérable dans les lignes usuelles), l'équation précédente devient :

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

dont la solution générale est de la forme : $U = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$

avec $v = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} =$ vitesse de propagation du phénomène

¹voir également "Energie Electrique", vol. XII, pp. 205 et suivantes, EPFL, Aguet + Morf [6]

où $c_0 =$ vitesse de la lumière $(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})$

$\mu_r =$ perméabilité (1 dans le vide, dans l'air)

$\epsilon_r =$ constante diélectrique de l'isolant

f_1 et f_2 sont des fonctions arbitraires dépendant des conditions initiales.

$f_1(x - vt)$ est une onde progressive

$f_2(x + vt)$ une onde rétrograde.

$$Z_w = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \text{impédance d'onde}$$

câble d'énergie	10 ...	60 Ω
câble télécomm.	100 ...	150 Ω
ligne aérienne	300 ...	600 Ω

La résolution du système d'équation donne pour le courant, en posant :

$$i = \frac{u}{Z} = \frac{f_1(x - vt)}{Z_w} - \frac{f_2(x + vt)}{Z_w}$$

4.3.1 Réflexion - Réfraction

Lorsqu'une onde se propage dans un réseau, à chaque discontinuité, c'est-à-dire chaque fois que les paramètres changent de valeur, donc aussi l'impédance d'onde Z_w qui devient :

$$Z_{w2} = \sqrt{\frac{L'_2}{C'_2}}$$

une réflexion et une réfraction partielles vont se produire

Pour simplifier, considérons une onde rectangulaire se propageant à la vitesse v , le long d'une ligne d'impédance Z_{w1}

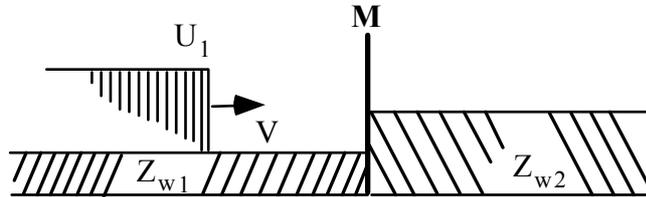


$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

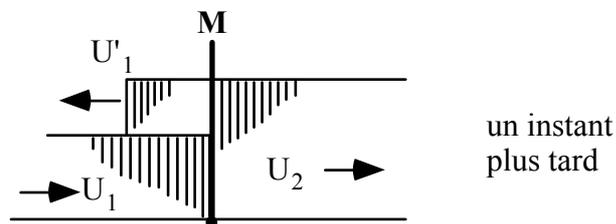
Il y circulera également un courant

$$i_1 = \frac{U_1}{Z_{w1}}$$

A l'extrémité de la ligne, se trouve (pt. M) un élément (ligne, câble, transfo, par ex.) dont l'impédance d'onde est Z_{w2}



u_1 est l'onde incidente, respectivement i_1 ; appelons u_2 l'onde réfractée (transmise) et u_1' l'onde réfléchie.



à tout instant : $u_1 + u_1' = u_2$ (1)

D'autre part, $i_1 + i_1' = i_2$ (2)

u_1, i_1, u_2, i_2 sont des ondes progressives

u_1' et i_1' sont des ondes rétrogrades

donc :

$$u_1 = Z_{w1} i_1 \qquad i_1 = \frac{u_1}{Z_{w1}}$$

$$u_2 = Z_{w2} i_2 \qquad i_2 = \frac{u_2}{Z_{w2}}$$

$$u_1' = -Z_{w1} i_1' \qquad i_1' = \frac{u_1'}{Z_{w1}}$$

En introduisant la valeur des courants dans l'équation (2) et en combinant avec l'équation (1), on établit que :

$$u_1' = \frac{Z_{w2} - Z_{w1}}{Z_{w2} + Z_{w1}} u_1$$

$$u_2 = \frac{2 Z_{w2}}{Z_{w2} + Z_{w1}} u_1$$

$$r_u = \frac{Z_{w2} - Z_{w1}}{Z_{w2} + Z_{w1}} \quad \text{est le facteur de réflexion}$$

$$t_u = \frac{2 Z_{w2}}{Z_{w2} + Z_{w1}} \quad \text{est le facteur de transmission}$$

L'onde réfléchie sera **positive** si $Z_{w2} > Z_{w1}$; dans ce cas, il y aura augmentation de la surtension au point de transition ; par exemple, passage d'une ligne aérienne à un transfo, ou d'un câble à une ligne aérienne. Dans une telle situation, **c'est donc à l'endroit de la transition que l'on peut craindre une rupture de diélectriques.**

Cas particuliers :

a) ligne à vide : $Z_{w2} = \infty$

$$r = +1 \quad t = 2$$

la tension est doublée à l'extrémité de la ligne; le courant est nul car :

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_{w2}} = 0$$

$$i'_1 = -i_1$$

l'onde réfléchie est de même phase et de même amplitude.

b) ligne à terre ou en court-circuit : $Z_{w2} = 0$

$$r = -1 \quad t = 0$$

la tension est nulle, mais le courant est doublé :

$$i'_1 = i_1 ; i_2 = 2 i_1$$

l'onde réfléchie est déphasée de 180° et de même amplitude

c) ligne adaptée $Z_{w2} = Z_{w1}$

$$r = 0 \quad t = 1$$

il n'y a pas de réflexion.

4.3.2 Détection des défauts dans les câbles

Les ruptures, courts-circuits, dans les câbles présentent des discontinuités d'impédance. La détection des défauts utilise les principes décrits ci-dessus en envoyant une onde dans l'objet. Le temps d'aller-retour ainsi que la forme d'onde réfléchie permettent de localiser et définir le défaut.

Cette méthode est aussi utilisée pour localiser les décharges partielles dans les câbles, lors de l'essai correspondant.

4.4 Surtensions atmosphériques

4.4.1 Nature et comportement de la foudre

La foudre est une décharge électrique entre un nuage et le sol ou entre deux nuages. A la différence d'un condensateur, où les charges sont à la surface des électrodes conductrices, dans un nuage orageux, les charges sont portées par les gouttelettes d'eau ou les cristaux de glace ; leurs déplacements sont relativement lents, de telle sorte qu'une décharge ne met en jeu qu'une partie des charges contenues dans le nuage.

Ainsi, un coup de foudre est généralement constitué d'une **série de décharges**, utilisant le même trajet d'éclair, et séparées les unes des autres d'un temps variant entre quelques dizaines de microsecondes jusqu'à quelques dixièmes de secondes.

Les décharges entre nuage et sol sont **négatives** dans 90 % des cas ; elles frappent ainsi les points de l'électrode opposée aux points où le champ électrique est le plus fort : c'est-à-dire les pointes (arbres, clochers, pylônes, fils de lignes électriques, etc...).

On peut chiffrer approximativement les grandeurs d'un coup de foudre :

10 ⁸ à 10 ¹⁰ V	pour le potentiel d'un nuage ;
5 à 10 kV/m	pour le champ électrique au voisinage du sol pendant les orages ;
20 à 60 kA	pour l'intensité d'une décharge
200 kA	pour des valeurs extrêmes
10 à 300 C	pour les charges des nuages.

L'onde de choc présente un front de 1 à 5 μ s et une durée de demi-amplitude de 20 à 50 μ s (durée jusqu'à ce que la tension ait atteint la moitié de sa valeur maximum).

Les décharges négatives, partant du nuage suivant un canal nommé streamer, descendent vers le sol par échelons, avec une allure bifurquée. La vitesse de l'éclair est de 20 à 110 m/ μ s, correspondant à une vitesse en ligne droite entre 15 et 65 m/ μ s.

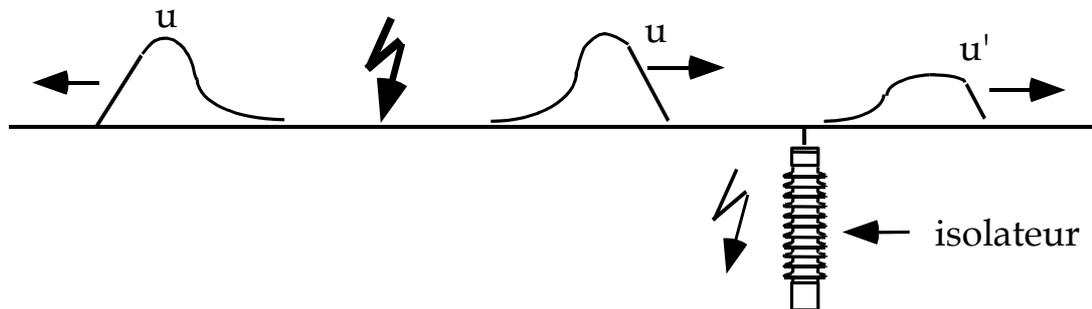
4.4.2 Mode d'action de la foudre sur les lignes

Aussi bien les réseaux BT que les réseaux HT sont influencés par la foudre et cela de quatre manières :

- par coup de foudre direct
- par coup de foudre indirect
- par induction électromagnétique (choc en retour)
- par induction électrostatique.

Coup de foudre direct :

La décharge atteint directement un ou plusieurs conducteurs de ligne. Les charges s'écoulent dans la ligne, dans les deux sens, en y développant un potentiel dépendant de l'impédance d'onde.



Exemple : Admettons qu'une décharge de 60 kA touche les 3 conducteurs d'une ligne d'impédance $Z_W = 500 \Omega$

le potentiel maximum sera :

$$\hat{U}_1 = \frac{Z \hat{I}}{6} = 5 \text{ MV}$$

Pour un front d'onde de 3 μs , cela donne un gradient moyen de 1,7 MV/ μs .

Si l'impédance de l'élément où s'écoulent les charges est très grande, le potentiel développé sera tel que l'objet frappé peut être mis en miettes (poteau de bois) ou volatilisé (fil de faible section).

L'onde ayant touché la ligne se déplace le long de celle-ci. Au passage d'un isolateur, elle peut provoquer un amorçage si sa valeur dépasse la tension disruptive de l'isolateur, tension de contournement au choc. Une partie des charges s'écoule à terre par le rapport (pylône par ex.). L'onde est alors réduite à une valeur u' .

Toutefois, aussi bien les valeurs u que u' sont très élevées et dépassent la tension provoquant un effet couronne ; cet effet consomme de l'énergie et réduit la tension u' .

Le coup de foudre direct est très dangereux pour le matériel. Aussi s'en protège-t-on par l'emploi des **fils de garde** , placés au sommet des pylônes et reliés à des prises de terre aussi soignées et rapprochées que possible.

Coup de foudre indirect

Lorsque la foudre frappe directement un pylône ou un fil de garde, les charges s'écoulent à la terre. Le potentiel atteint par le pylône est défini par l'impédance de celui-ci, mais surtout par sa **résistance de mise à terre** , qui dépend de la surface des électrodes et des caractéristiques du terrain environnant. Lorsque cette résistance est importante, le potentiel atteint par le pylône peut dépasser la tension de contournement des chaînes d'isolateur. Une décharge se produit à **l'envers** , vers la ligne, et une onde mobile est injectée dans celle-ci, d'amplitude au moins égale à la tension de contournement.

Ce coup de foudre étant limité en tension, il est moins redoutable que le précédent.

Induction électromagnétique (choc en retour)

Un coup de foudre tombant à proximité d'une ligne développe un champ d'induction magnétique suffisamment important pour y créer une surtension induite, dont l'ordre de grandeur peut être estimé par la formule suivante :

$$U_{\max} = Z_0 \cdot \frac{I_{\max} \cdot h}{d}$$

$$\text{où } Z_0 = \frac{0.25}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 30\Omega$$

h = hauteur du conducteur

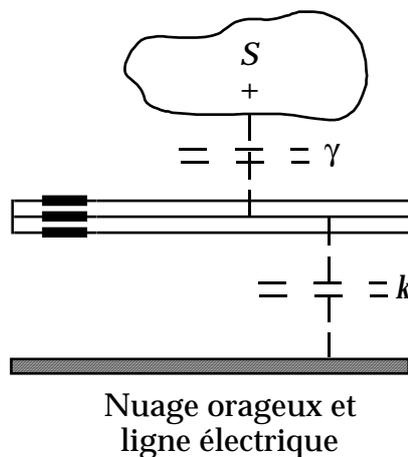
d = distance entre la ligne et l'impact de foudre

Des modèles plus détaillés existent et l'utilisation de programmes de calculs s'avère nécessaire pour plus de précision²

Induction électrostatique³ :

Soit, suivant la figure ci-dessous, un nuage orageux S, chargé par exemple positivement, couvrant une certaine étendue au-dessus d'une ligne L. Autour de ce nuage se développe un champ électrique dont les lignes de force vont du nuage à la terre, les unes directement, les autres en passant par la ligne L.

Si la ligne est *parfaitement* isolée du sol, ses conducteurs seront portés au potentiel du point où ils se trouvent dans le champ électrique.



²EPFL, Uni Bologne, Ianoz, Nucci

³Extrait de Mauduit II, pp. 458 et suivantes

Les surtensions apparaissent lorsque l'état électrique du nuage se modifie brusquement, par suite d'une décharge entre ce nuage et la terre ou un autre nuage.

Si le nuage est subitement déchargé, les charges accumulées sur la ligne en regard du nuage sont libérées et elles élèvent immédiatement le potentiel de cette partie à une valeur qui peut être considérable et qui est égale au potentiel qu'aurait eu cette zone sous l'action du nuage orageux si ces charges n'étaient venues l'annuler ou le réduire à une faible valeur. Les charges ainsi libérées et la surtension correspondante se déplacent vers les deux extrémités de la ligne sous la forme d'ondes mobiles.

L'expérience a montré que les ondes provenant de cette cause sont généralement peu dangereuses, car elles n'atteignent que des amplitudes relativement peu élevées.

4.4.3 Niveau isokéraunique

Les dangers menaçant les installations électriques, et par suite la nécessité d'installer des protections, varient dans de grandes proportions selon la situation géographique et géologique. On caractérise l'importance de ce danger par le niveau **isokéraunique** qui est :

nombre de journées où l'on entend le tonnerre, par année.

Un niveau de 5 à 10 correspond à une zone peu orageuse, celui de 50 est considéré comme relativement orageux.

Cette mesure a tendance à être remplacée par des statistiques beaucoup plus précises, issues de **systèmes de détection de la foudre**. Des réseaux d'antennes fournissent, sur la base de champs électromagnétiques développés par les coups de foudre couplés à une triangulation, l'heure, le lieu de l'impact et son amplitude.

On peut aussi caractériser le danger par le nombre de fois où la foudre a touché le réseau en une année et le nombre de déclenchements qui en ont résulté.

4.5. Dispositifs de protection

Ils peuvent être classés en deux catégories :

- les parafoudres (ou déchargeurs),
- les éclateurs à tige ou de coordination.

4.5.1 Définitions et caractéristiques

Les principales grandeurs suivantes sont utilisées dans les parafoudres :

La **tension d'amorçage** est la tension minimum pour laquelle le parafoudre fonctionne. A 50 Hz, elle aura pour valeur au moins 2 fois la valeur efficace la plus élevée du réseau. Au choc, elle dépend très fortement de la forme d'onde ; elle est généralement définie pour une onde 1,2/50 ou 4/10 et 8/20 pour des ondes de courant.

La **tension résiduelle** est la tension maximum aux bornes du parafoudre pendant le passage du courant de décharge. Tension et courant sont liés par :

$$U_r = I_{\text{décharge}} \cdot R_{\text{tot parafoudre}}$$

La **tension d'extinction** ou tension de désamorçage est la valeur la plus élevée de la tension de service pour laquelle le parafoudre interrompt son courant de suite. C'est généralement la valeur qui désigne le parafoudre.

Le **pouvoir de décharge** est l'intensité maximum du courant que le parafoudre peut écouler, plusieurs fois de suite, sans être endommagé.

Le **courant de suite** est le courant fourni par le réseau et qui subsiste un temps plus ou moins long après le passage du courant de décharge. Il doit s'annuler de lui-même à la fin d'une alternance de la tension.

Un parafoudre doit remplir les conditions suivantes :

- a) à l'apparition d'une surtension, mettre le conducteur à la terre dans un temps très court ($< 0,1 \mu\text{s}$),
- b) se désamorcer rapidement après l'écoulement à la terre de la décharge,
- c) avoir une tension d'amorçage et une tension résiduelle aussi stables que possible pendant des années; elles doivent en outre être indépendantes de la polarité et de la forme de l'onde, des conditions climatiques.

4.5.2 Aperçu historique

On utilisait les efforts électrodynamiques ou la pression de gaz dégagés par des matériaux spéciaux lorsqu'ils sont portés à haute température (par l'arc), pour éloigner brusquement les deux électrodes de l'éclateur ou parafoudre et interrompre l'arc. Ces éclateurs à expulsion produisent une coupure très rapide de l'arc, avec une tension résiduelle très faible, même sous des intensités considérables; leur tension d'amorçage présente une grande marge d'indétermination.

On utilisait aussi des billes d'oxyde de plomb; le plomb fondait sous l'effet de l'arc. Ces technologies ne sont actuellement plus utilisées !

4.5.3 Les parafoudres courants

La mise au point de matériaux permettant de réaliser des résistances à caractéristique inverse a permis de résoudre le problème des parafoudres : avoir un courant de suite minimum et une tension résiduelle pas trop élevée.

Les modèles les plus courants sont les parafoudres à éclateurs avec résistance et les parafoudres à oxydes métalliques, technique plus récente.

Exemple 1 : parafoudre à éclateurs et résorbite

Légende de la figure ci-après:

- a: Evolution des grandeurs électriques lors du processus d'amorçage et d'extinction
- b: Élément de parafoudre à l'état normal
- c: Élément de parafoudre traversé par le courant de décharge
- d: Élément de parafoudre traversé par le courant de suite
- e: Élément de parafoudre à l'état normal

N_p Niveau de protection garanti

U Tension de service

U_a Tension d'amorçage

U_L Chute de tension dans l'arc au cours du processus d'extinction

U_p Tension résiduelle au cours du processus de décharge

U_R Chute de tension dans les résistances en résorbite au cours du processus d'extinction

U_S Tension de choc

i_S Courant de commande de la répartition de la tension

i_A Courant de décharge

i_N Courant de suite

A Point d'amorçage et arc formé par le courant de décharge

B Bobine de soufflage

E Electrode d'éclateur

K Chambre d'extinction en matière céramique

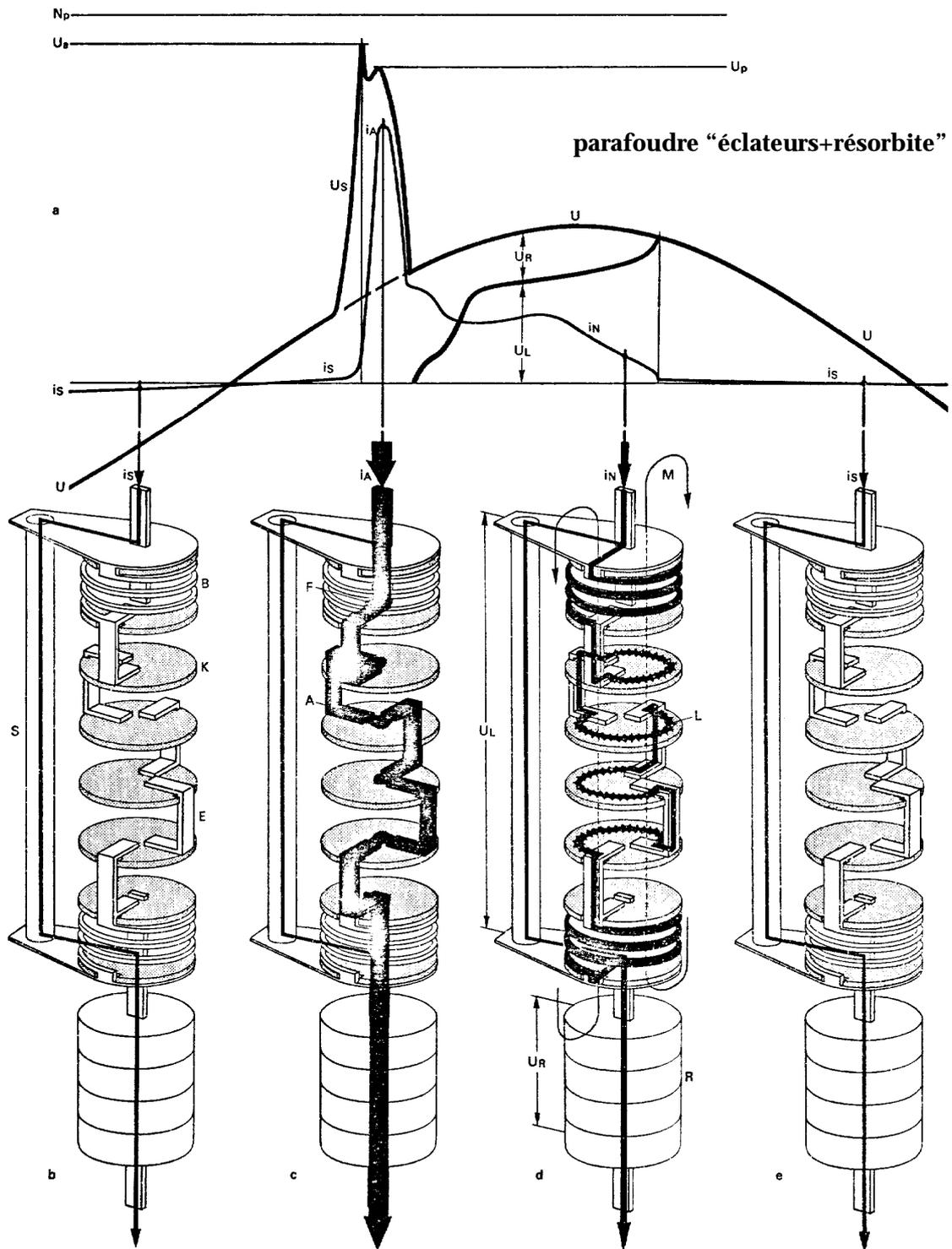
L Arc au cours du processus d'extinction

M Lignes de force du champ magnétique

S Résistance commandant la répartition de la tension

F Eclateur de shuntage

R Résistances non linéaires

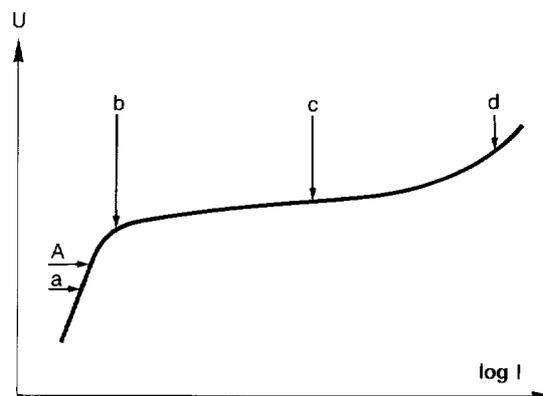


Pour les résistances en résorbite, les rapports tension-courant sont les

I	UR
1 kA	60 %
10 kA (I_N)	100 %
100 kA	170 %

Exemple 2 : Parafoudres à oxydes métalliques⁴

Les parafoudres à oxydes métalliques sans éclateurs emploient, en tant que partie active, une varistance céramique composée, pour la plus grande partie, d'oxyde de zinc (ZnO). La figure ci-dessous illustre schématiquement la courbe caractéristique courant-tension d'une telle varistance de parafoudre. On a choisi pour les abscisses une échelle logarithmique. Si le courant est multiplié par 10^7 , la tension aux bornes de la varistance n'est multipliée que par 2 environ.



Courbe caractéristique courant-tension d'une varistance à oxydes métalliques

- a = partie inférieure linéaire
- b = coude
- c = partie fortement non linéaire
- d = partie supérieure linéaire (zone "turn up")
- A = point de travail (tension appliquée en permanence)

Un parafoudre sans éclateurs est dimensionné de manière que la tension qui peut être appliquée en permanence à ses bornes se trouve, environ, au point A de la courbe caractéristique de la figure. Dans ces conditions, il s'écoule un courant à prédominance capacitive. Si la tension aux bornes augmente à cause d'une surtension, le parafoudre passe dans la plage conductrice. La composante ohmique du courant, jusqu'ici très petite, augmente rapidement pendant que la composante capacitive n'augmente que très peu. A la tension appelée de référence, qui se trouve un peu au-dessus du coude de la courbe de la figure, il ne passe plus qu'un courant pratiquement ohmique (a). Ceci s'applique aussi à la partie non linéaire (c) ainsi qu'à la zone "turn up" (d).

4.5.4 Emplacement des parafoudres

Les parafoudres seront toujours placés le plus près possible des installations à protéger, ou aux jonctions lignes aériennes-câbles.

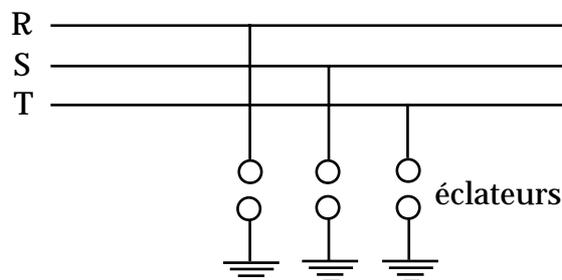
⁴Publication ABB CH-HS 1061 87 F "Parafoudres type MWE, MWL et MWM"

Les parafoudres doivent être placés au voisinage immédiat des alternateurs et des transformateurs. En effet, du fait qu'ils présentent une grande impédance, il y aura réflexion et donc augmentation locale de la tension. La combinaison des ondes peut conduire à des ventres et des noeuds. Un parafoudre placé à quelques dizaines de mètres peut très bien se trouver dans un noeud et ne **jamais amorcer**.

Dans les grands postes, on aura même intérêt à placer plusieurs parafoudres sur les mêmes barres.

4.5.5 Les éclateurs

Le moyen le plus simple de protéger un réseau est de placer des éclateurs selon le schéma ci-après :

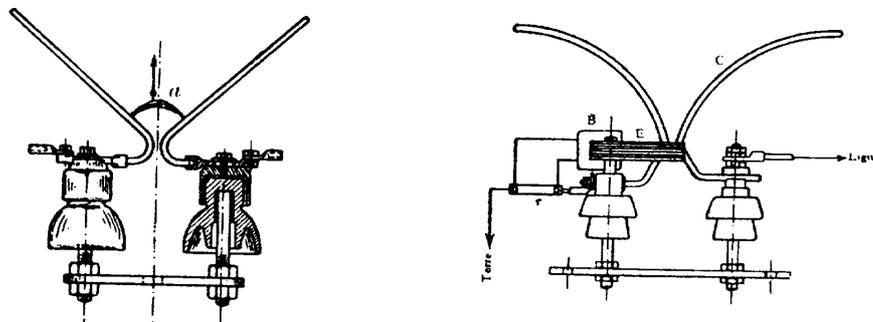


Bon marché et facilement réalisable, l'éclateur présente un grave inconvénient :

l'arc amorcé par la surtension crée un milieu ionisé qui fait que le courant de suite est pratiquement égal au courant de court-circuit. Il s'ensuivra une **interruption de service** provoquée par les protections contre les surintensités, ce qu'il faut naturellement chercher à éviter.

D'autre part, son fonctionnement dépend des conditions atmosphériques.

Une autre amélioration de l'éclateur a été apportée dans le **parafoudre à cornes**, auquel on peut encore adjoindre un soufflage magnétique.



Parafoudres à cornes

simple

avec soufflage magnétique

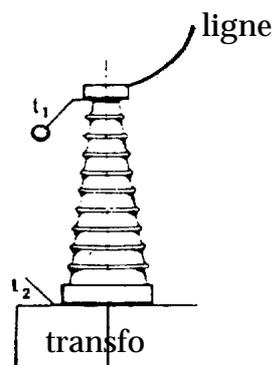
Il peut arriver, lorsque le soufflage est intense, que l'arc soit interrompu avant la fin de la décharge ; l'arc peut alors se réamorcer entre les deux coudes et ceci plusieurs fois.

4.5.6 Eclateurs à tiges ou de coordination

Ils sont constitués de deux tiges de quelques mm de diamètre, placées suivant le même arc, et reliées l'une (t_1) à l'appareil à protéger, l'autre (t_2) à la terre. L'extrémité sous tension (t_1) est munie d'une sphère pour limiter l'effet couronne. La distance entre les tiges fixe la valeur de la tension d'amorçage. Pour cela, l'une des tiges est coulissante. Son niveau de protection au choc est approximativement donné par :

$$U = 10 (d + 1) \quad [kV_{\text{crête}}]$$

d = distance des tiges en cm.



Exemple de protection
d'un transformateur par
éclateur à tiges

Ces éclateurs n'ont pratiquement aucun pouvoir de coupure.

Ils sont destinés **en dernier ressort** à écrêter les surtensions dans le cas où les autres systèmes n'auraient pas fonctionné.

On préférera donc l'usage de parafoudres pour assurer une bonne *coordination de l'isolement*, avec plus de sécurité.

Chapitre V

5. ESSAIS DU MATERIEL HAUTE TENSION

La coordination de l'isolement nécessite divers types d'essais pour l'étude et la vérification des machines et appareils des installations à haute tension. **On distingue 4 catégories d'essais :**

1. **Les essais à haute tension alternative** et fréquences industrielles à 50 ou 60 Hz. La tension aux bornes des transformateurs d'essais à HT est le plus souvent non sinusoïdale à cause de la saturation du circuit magnétique.

On utilise actuellement des systèmes résonants pour lesquels la tension est parfaitement sinusoïdale.

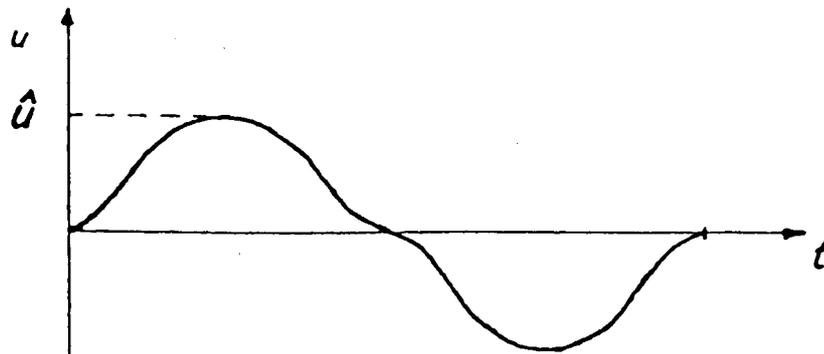


fig. 5.0-1 Tension non sinusoïdale

La tension d'essai de crête sera :

$$\hat{U}_{\text{essai}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{essai}}$$

U_{essai} : tension d'essai prescrite par les règles (voir chapitre 2) en KV_{eff} .

car $\hat{U} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}}$ en sinusoïdal.

Le plus souvent, la tension d'essai est mesurée à l'aide d'un dispositif de mesure de tension de crête.

2. **Les essais sous HT continue** sont employés essentiellement pour les câbles et condensateurs qui nécessiteraient une énergie réactive alternative trop importante et pour le matériel destiné au réseau à HT continue.

3. *Les essais de choc* ou d'impulsion, c'est-à-dire sous onde unidirectionnelle.
4. *Des essais* spéciaux *sous HT et haute fréquence* par exemple pour des essais d'isolateurs, de transformateurs ou de vieillissement des câbles.

5.1. Couplage pour essais sous HT alternative à 50 ou 60Hz

5.1.1 Transformateurs HT

Exemple : essai d'un transfo.

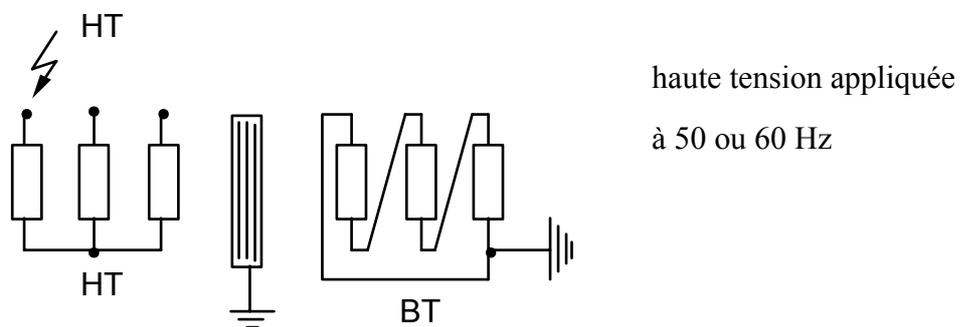


fig. 5.1-1.

La figure ci-dessous représente le schéma interne d'un transformateur d'essai HT et ses possibilités de couplage.

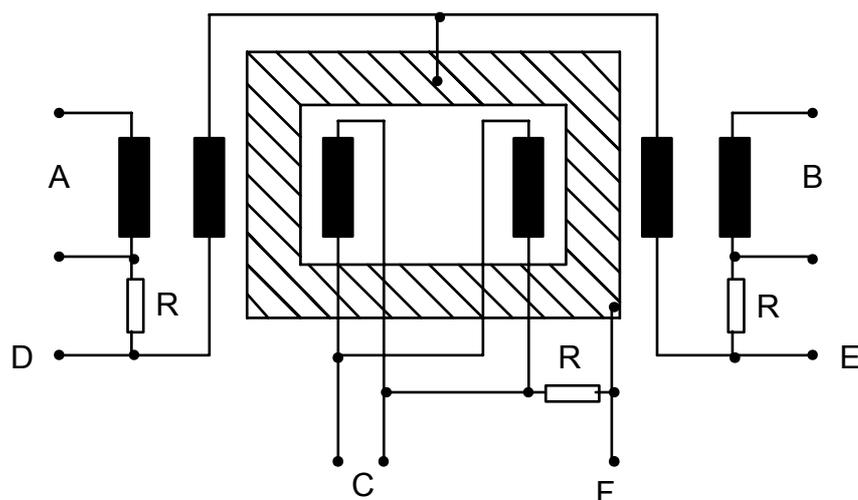


figure 5.1-2: Connexions et caractéristiques du transfo HT modèle TZG 100/5 a

Tableau des connexions du transfo TZG:

Alimentation en	Terréen	Sorties entre	Tension nom. kV_{eff}	Puissance nom. kVA	Tension de c.c. en % env.
A	D	F et D	50	2.5	3.7
	D	E et D	100	5	7.6
B	E	F et E	50	2.5	3.7
	E	D et E	100	5	7.6
C	F	D et F	50	2.5	2.7
	F	E et F	50	2.5	2.7
	F	D et E	100	5	5.5

Les puissances indiquées se rapportent à un service temporaire de 30 min.

La tension primaire vaut normalement 220 V - 50Hz.

La figure ci-après montre l'aspect physique du même transformateur;

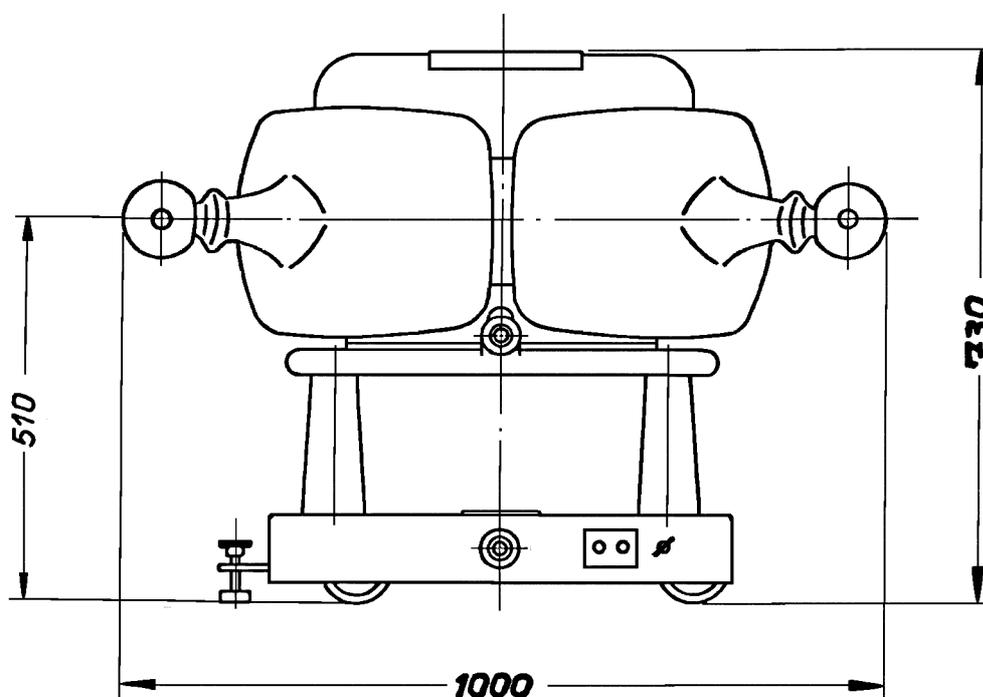


Figure 5.1-3 Transfo modèle TZG

La figure suivante montre un montage en cascade de deux transformateurs du même type, permettant de doubler la tension.

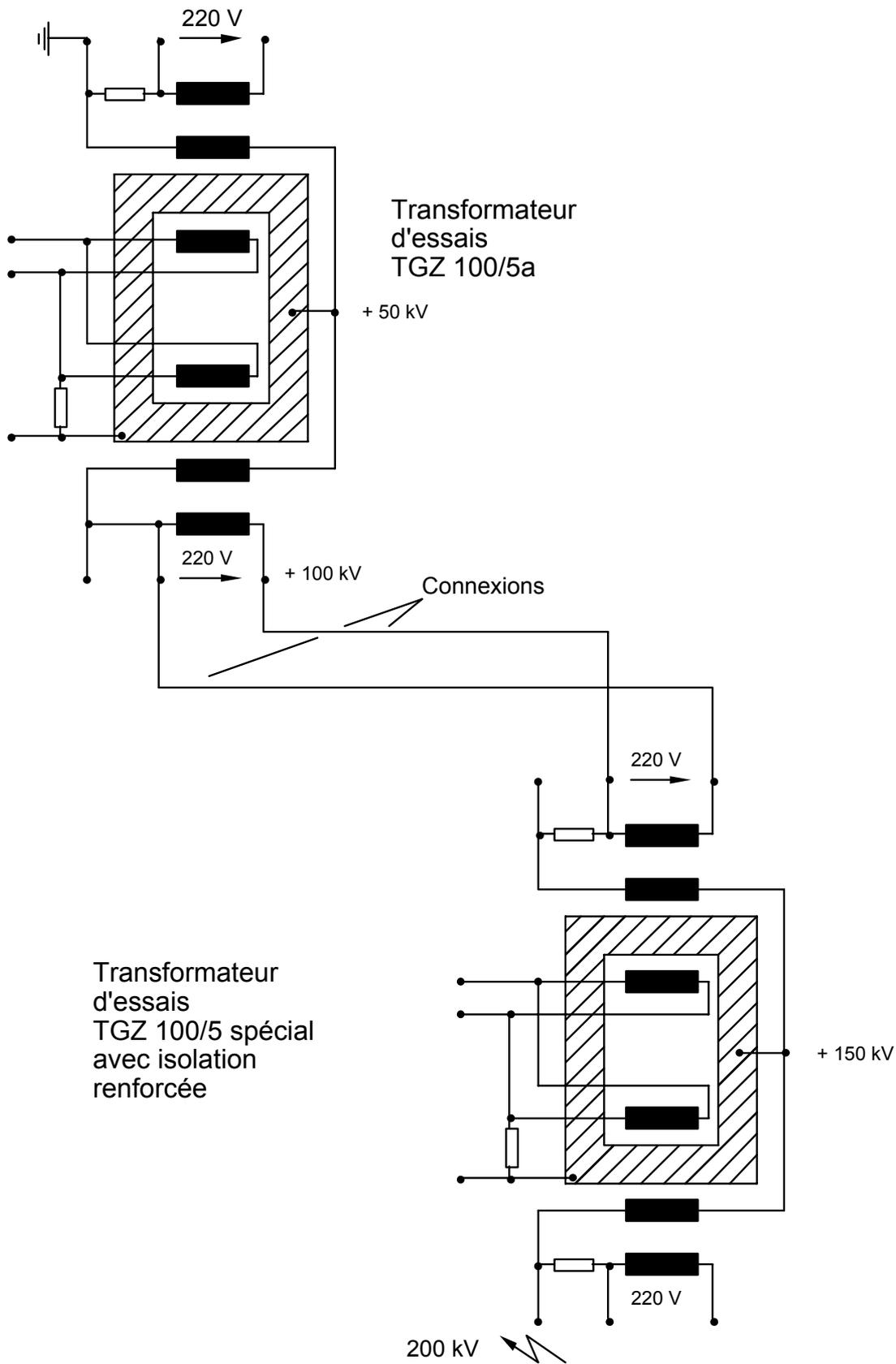


fig. 5.1-4 Transformateur cascade

5.1.2 Systèmes résonants ¹

Depuis une trentaine d'années, on utilise avec succès les systèmes résonants pour effectuer les essais diélectriques sur tous les matériels purement capacitifs tel que les câbles HT ou des appareillages isolés au SF6.

On emploie avec avantage ce genre d'équipement d'essai dès qu'un courant élevé (4 A) est nécessaire. Tous les essais courants peuvent être réalisés sauf les essais sous pluie ou de pollution. Ce genre d'équipement d'essai se caractérise par ses faibles dimensions et poids, et par sa facilité d'installation et d'utilisation.

De plus, la consommation électrique d'un tel système est réduite d'un facteur 10 à 15 par rapport à un système d'essai à transformateurs classiques.

5.1.3 Résonance dans un circuit électrique

Si, dans un circuit électrique, un condensateur et une inductance de même impédance sont branchés en série ou en parallèle, l'on constate un phénomène de résonance, soit série, soit parallèle selon le schéma.

L'on a :

Impédance du condensateur

Impédance de l'inductance

$$x_c = \frac{1}{\omega C} \quad [\Omega]$$

$$x_L = \omega L \quad [\Omega]$$

$$\text{avec } \omega = 2\pi f \quad [\text{rad/s}]$$

Pour la résonance, il faut que $X_c = X_L$

En fonction du système d'essai à disposition :

1) Fréquence variable $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad [\text{Hz}]$

La fréquence est variée pour obtenir la résonance

2) Inductance variable $L = \frac{1}{\omega^2 C} \quad [\text{H}]$

L'inductance du système d'essai est variée pour obtenir la résonance, à la fréquence du réseau

avec

C = capacité de l'objet en essai [F].

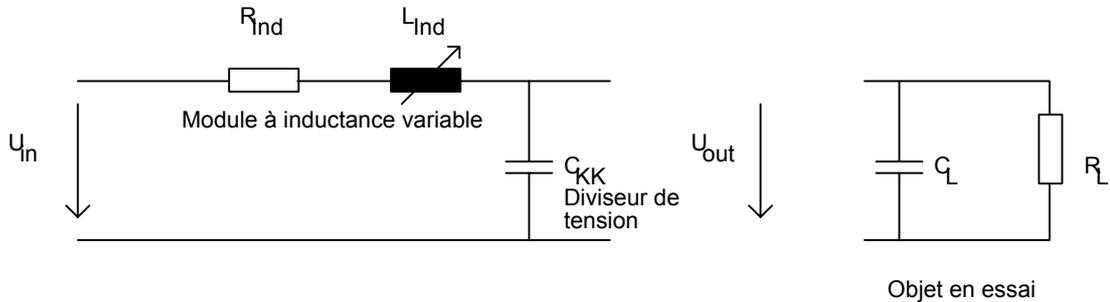
L = inductance du système d'essai [H].

La majorité des systèmes d'essai sont à inductance variable.

¹ adapté du document aimablement fourni par M. Furrer, ing. ETS, Haefely

5.1.4 Résonance série

5.1.5 Schéma général



5.1.6 Facteur de qualité du système:

$Q_{\text{Sys}} = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}}$ [-] se compose du facteur de qualité du système d'essai seul et du facteur de qualité de la charge. Le facteur de qualité, qui est aussi le rapport entre la puissance réactive et active, vaut environ 100 [-] pour le système d'essai.

Pour le système d'essai: $Q_{\text{Ind}} = 100$ [-]

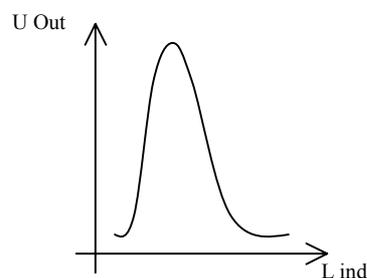
Pour la charge: $Q_{\text{Ind}} = \omega \cdot C_L \cdot R_L$ [-]

Pour le système complet:

$$Q_{\text{Sys}} = \frac{Q_{\text{Ind}} \cdot Q_L}{Q_{\text{Ind}} + Q_L} [-] = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} \text{ mais aussi } \frac{S_{\text{Out}}}{S_{\text{In}}} !$$

5.1.7 Caractéristiques d'un circuit de résonance série

La tension d'essai U_{out} dépend de l'état de résonance du circuit.



U_{out} varie en fonction de l'état de charge. Si la charge varie, U_{out} change également. De ce fait, un système résonant ne convient pas pour effectuer des essais de pollution ou sous pluie.

Le système modulaire des inductances variables permet, par une connexion en série, d'obtenir des tensions d'essai très élevées (150 - 2400 kV AC).

Il est nécessaire de fournir U_{In} (5 - 70 kV) pour exciter le système.

5.1.8 Avantages et inconvénients

Avantages: - Modulaire très hautes tensions
 - Compact, léger
 - Faible consommation env. 1/50 de la puissance de sortie seulement
 - Tension d'essai filtrée

Inconvénients: - Tension de sortie dépendant de l'état de résonance
 - Objets capacitifs uniquement
 - Tension d'excitation nécessaire

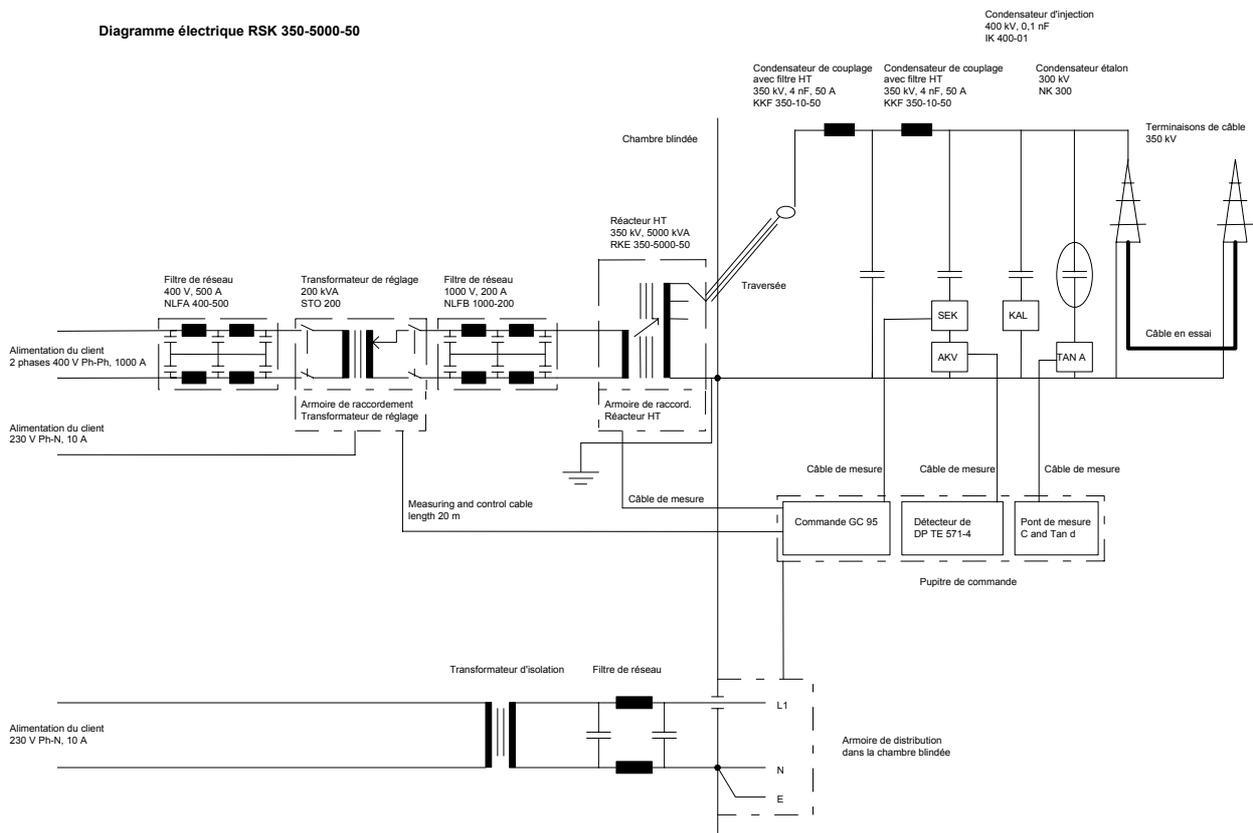
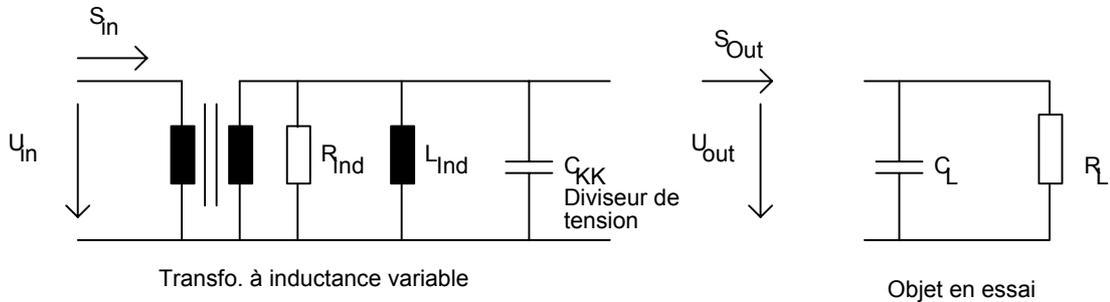


Figure 5.1-5 : Schéma résonance série

5.1.9 Résonance parallèle

5.1.10 Schéma général



5.1.11 Facteur de qualité du système

$Q_{\text{Sys}} = \frac{S_{\text{Out}}}{S_{\text{In}}} [-]$ se compose du facteur de qualité du système d'essai seul et du facteur de qualité de la charge.

Pour le système d'essai: $Q_{\text{Ind}} = 50 [-]$

Pour la charge: $Q_{\text{Ind}} = \omega \cdot C_L \cdot R_L [-]$

Pour le système complet:

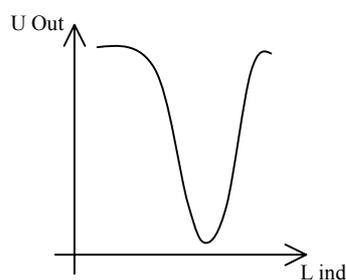
$$Q_{\text{Sys}} = \frac{Q_{\text{Ind}} \cdot Q_L}{Q_{\text{Ind}} + Q_L} [-] = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} \text{ mais aussi } \frac{S_{\text{Out}}}{S_{\text{In}}}$$

5.1.12 Caractéristique du circuit parallèle

La tension de sortie U ne dépend que du rapport de transformation (fixe) du système résonnant et la tension d'entrée.

Du fait de l'utilisation des systèmes à cuve équipés de traversées, il est possible d'avoir plusieurs sorties de tension (Prises intermédiaires).

Courant de sortie dépend de l'état de la résonance, pour U_{Out} constant:



5.1.13 Avantages et inconvénients

- Avantages:
- Tension de sortie stable
 - Prises intermédiaires de tension
 - Raccordé à la tension du réseau
 - Pas de transformateur d'excitation nécessaire

- Inconvénients:
- Tensions limitées (400 kV)
 - Système fixe

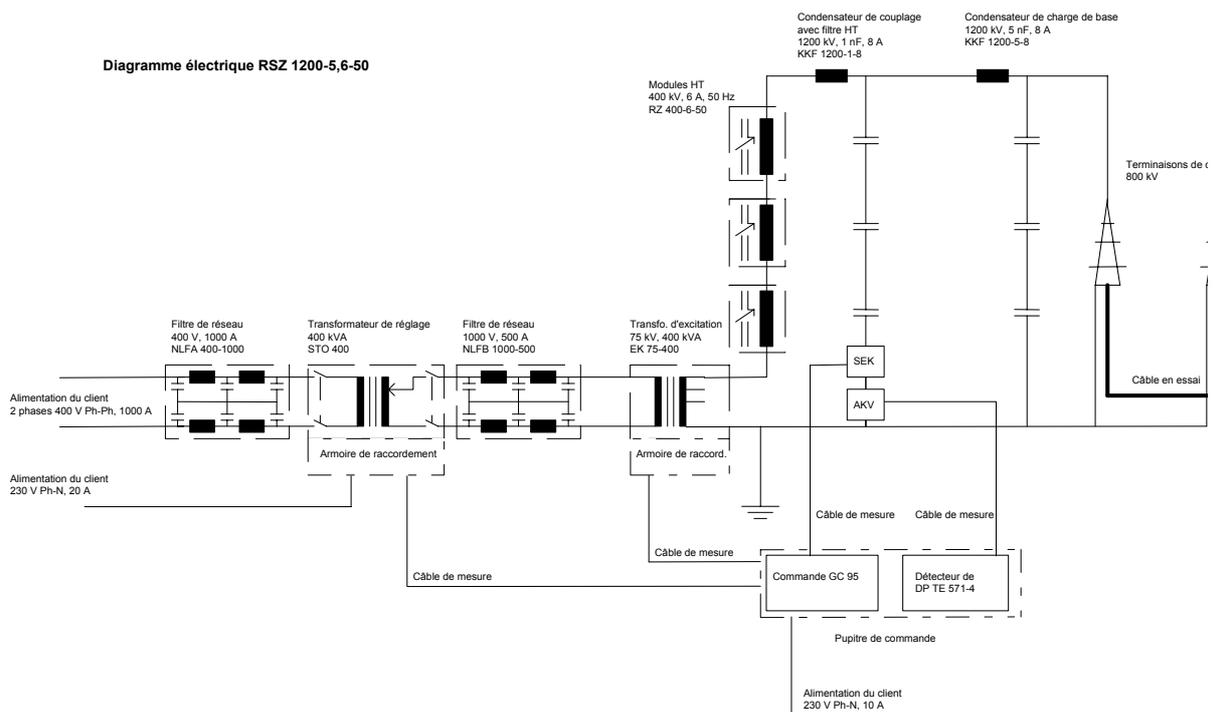


Figure 5.1-6 : Schéma résonance Parallèle

5.2. Essais sous haute tension continue

Exemple : essai sur le site d'un câble sous haute tension continue. Haute tension appliquée pendant 15 minutes. But : sortir les éventuels défauts de pose (jonctions, extrémités...).

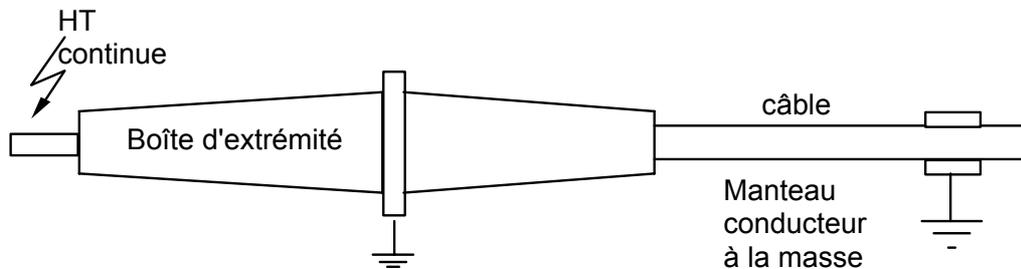


fig. 5.2-1 Essai d'un câble après pose

$$U_{\text{essai}} = 4 \cdot U_{\text{o eff}}$$

$$U_{\text{o eff}} = \text{tension simple}$$

Couplages des redresseurs pour production des hautes tensions continues

On utilise les couplages classiques à une ou deux alternances et très souvent des doubleurs ou multiplicateurs de tension.

Couplage Villard avec dispositif de tension continue supplémentaire

Il s'agit d'un couplage doubleur de tension (figure 5.2-2). Afin de comprendre le schéma, observons le processus de charge à vide ($R_g = \infty$). A chaque alternance négative de tension u , le courant de charge du condensateur C_1 dans le circuit 1-1'-2-0 est plus grand que le courant de décharge de chaque alternance positive du circuit 3-2-1-0. En effet, la capacité équivalente aux deux capacités en série $C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ est toujours plus petite que C_1 . Il en résulte que la tension aux bornes de C_1 augmente plus pendant les alternances négatives qu'elle ne diminue pendant les alternances positives et atteint finalement 100 % de la valeur de crête de u . Le condensateur C_2 reçoit ainsi des chocs de courant jusqu'à ce qu'il ait atteint la tension de 200 %. L'ensemble du couplage est alors pour cet état de charge des condensateurs, sans courant, c'est-à-dire que l'état à vide est atteint. On remarque que pour les valeurs instantanées positives des tensions u , les deux condensateurs sont en opposition à travers la diode V_2 . Le point 2 a le potentiel de l'onde, lequel oscille entre 0 et 200 % entre deux alternances consécutives (voir fig. 5.2-3). Le point 3 a un potentiel constant de 200 %, lequel entre en ligne de compte pour la tension de sortie continue à vide. La partie du couplage comprenant le condensateur C_1 , la diode V_1 , la résistance additionnelle R_v et l'enroulement du transformateur est appelé "étage de base du couplage Villard". La diode V_2 et le condensateur C_2 forme "le dispositif de tension continue supplémentaire".

La figure 5.2-3 du potentiel et du courant est valable en charge. Le dimensionnement du couplage se fait de la même manière que pour le couplage de Greinacher (voir bibliographie).

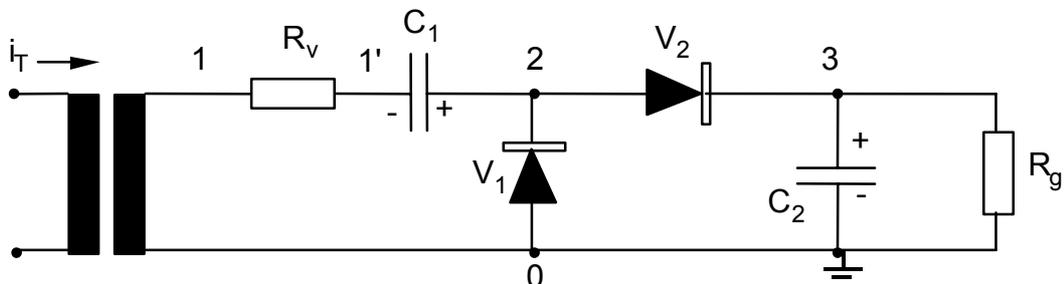


fig. 5.2-2 Couplage Villard / Greinacher

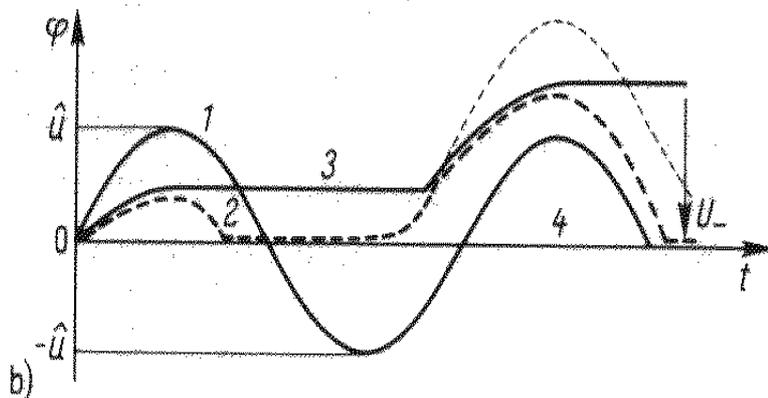


Fig. 5.2-3 graphe temporel

Couplage multiplicateur de tension (couplage en cascade de Greinacher):

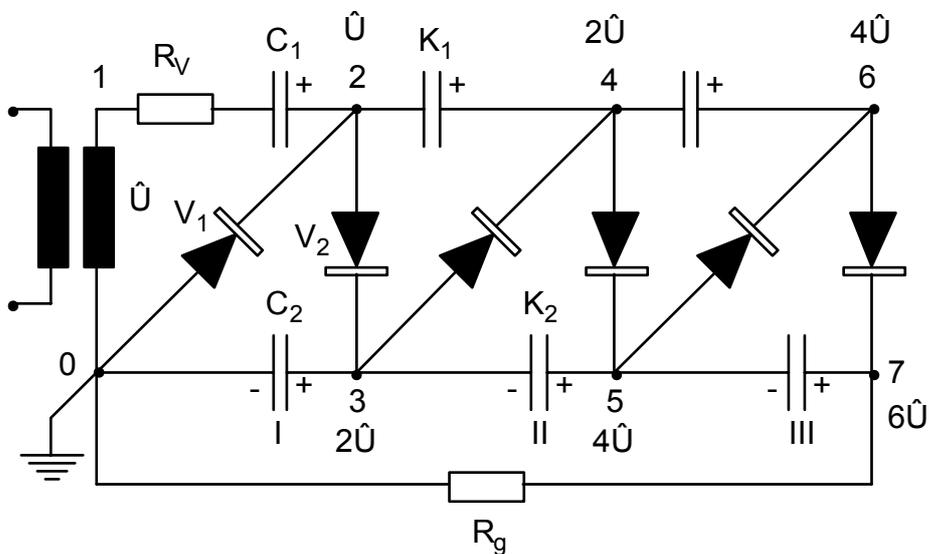


Figure 5.2-4 Couplage de Greinacher en cascade

L'étage de base du couplage Villard / Greinacher avec dispositif de tension continue supplémentaire est utilisé comme étage de base I (figure 5.2-2), auquel on ajoute des étages supplémentaires de condensateurs et de diodes. On forme de cette manière deux colonnes de condensateurs k_1 et k_2 . Le circuit est parcouru pendant les alternances de charge négatives selon la figure 5.2-5 et pendant les alternances de charge positives selon la figure 5.2-6.

Alternance négative

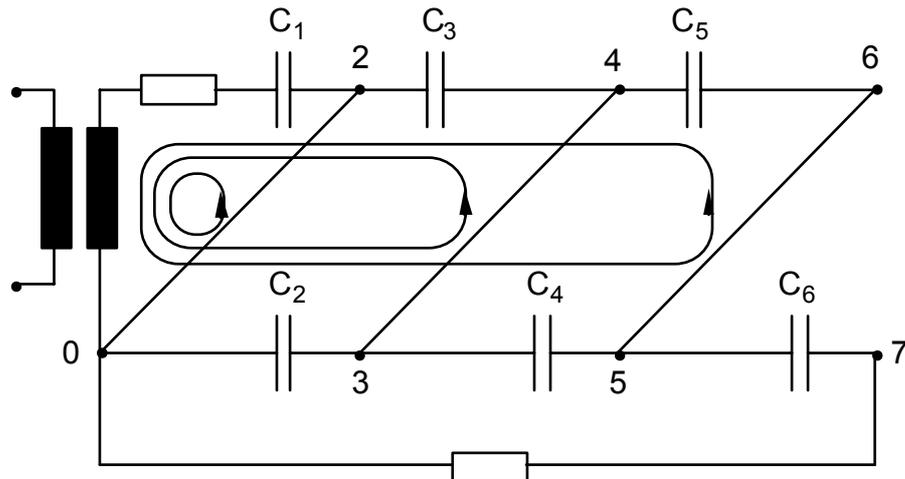


Figure 5.2-5 Alternances négatives

Alternance positive

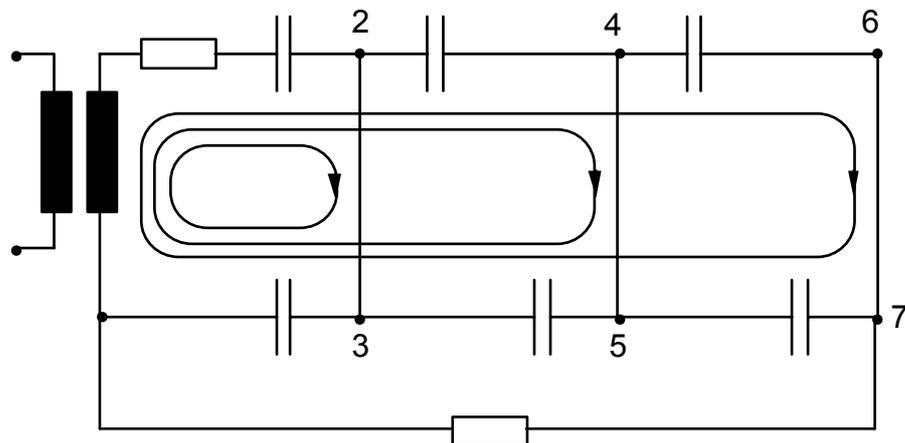


Figure 5.2-6 Alternances positives

Les diodes constituent également dans le circuit des connexions équipotentiels. Pour les valeurs de crête négatives de u , les couples de points 2-0 4-3 6-5 sont équipotentiels et pour les valeurs de crête positives 2-3 4-5 6-7. Nous avons vu lors de l'étude du couplage de base Villard que le condensateur C_1 se charge à 100 % de la valeur de crête de u et le condensateur C_2 à 200 %. Il en résulte que les potentiels des couples de points et les tensions des autres condensateurs sont fixés.

Ainsi, pour des valeurs de crêtes négatives de u , le point 2 a le potentiel nul du point 0, le point 4, le potentiel 200 % du point 3; au condensateur C_3 est appliquée ainsi la tension continue de 200 %. Pour les valeurs de crêtes positives de u , pour lesquelles les potentiels connus précédemment de la colonne K_1 sont augmentés de 200 %, le point 5 de la colonne K_2 a le potentiel + 400 % du point 4; au condensateur C_1 est appliqué la tension de 200 %. On peut ainsi prouver que pour chaque condensateur la tension progresse de 200 % de la valeur de crête de u .

A vide, la tension continue totale est ainsi égale à n fois la tension d'un étage de 200 % de la valeur de crête de u . Les courbes des potentiels et courants en charge du couplage Villard avec dispositif de tension continue supplémentaire sont similaires à la représentation de la figure 5.2-3.

5.3. Essai spéciaux sous haute tension et haute fréquence

Pour ces essais, on utilise en général un transformateur Tesla TT, qui a pour but de produire des trains d'ondes à haute fréquence et haute tension qui seront appliqués à l'objet à essayer, par exemple un isolateur I . Le schéma de principe est donné par la figure 5.3-1.

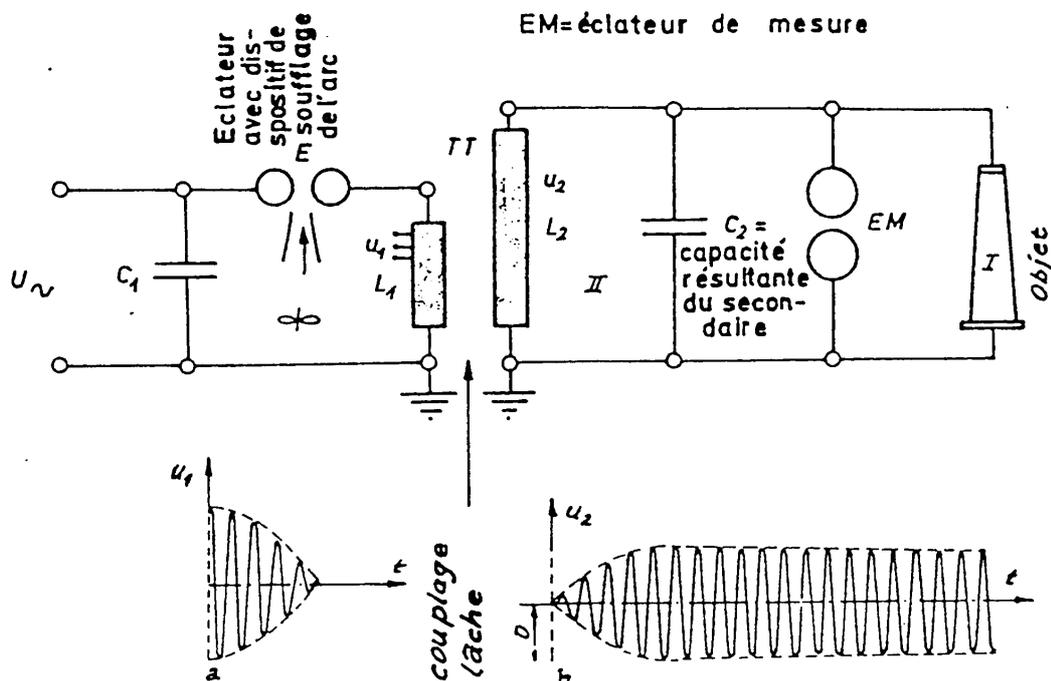


fig. 5.3-1 a) Transformateur Tesla, schéma et b) tensions

Principe de fonctionnement :

Le condensateur C_1 est chargé sous une tension alternative U constante. Lorsque la tension disruptive de l'éclateur E est atteinte, il se décharge brusquement dans le circuit C_1 , R_E , L_1 (R_E = résistance totale du primaire, y compris la résistance de l'arc de l'éclateur E), créant une oscillation amortie à haute fréquence de fréquence propre :

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

laquelle induit la tension u_2 dans le secondaire.

La forme des courbes des tensions u_1 et u_2 du transformateur Tesla est représentée sur la figure 5.3-1 b.

Pour obtenir des trains d'ondes à chaque passage des valeurs de crêtes positives ou négatives de la tension primaire, il est nécessaire de couper l'arc sur l'éclateur E au moyen d'un dispositif de soufflage à air comprimé ou év. par thyristor(s) si $U < 50$ kV.

D'autre part, le couplage magnétique entre les deux enroulements est lâche. Un couplage serré ne peut pas être employé, car la réaction du secondaire sur le primaire empêche la production régulière de trains d'ondes.

Note complémentaire au sujet de la décharge dans le circuit série $C_1 - R_E - L_1$:
Rappel

Schéma équivalent

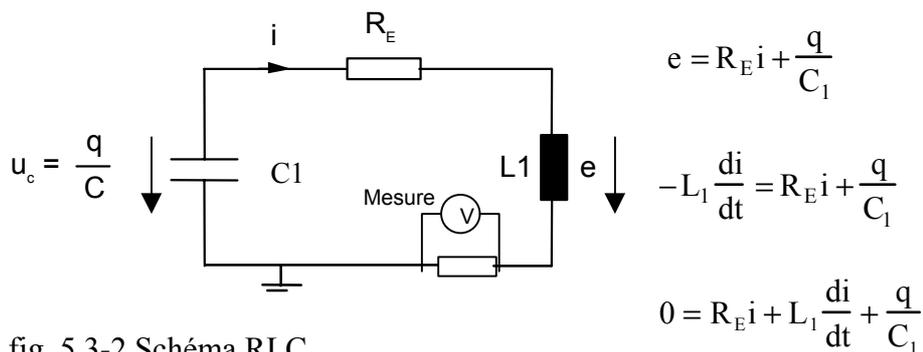


fig. 5.3-2 Schéma RLC

$$i = \frac{dq}{dt} = C_1 \cdot \frac{du_c}{dt} \rightarrow \frac{di}{dt} = C_1 \frac{d^2 u_c}{dt^2}$$

$$R_E C_1 \frac{du_c}{dt} + L_1 \cdot C_1 \frac{d^2 u_c}{dt^2} + u_c = 0$$

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R_E}{L_1} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{L_1 \cdot C_1} \cdot u_c = 0$$

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + 2\delta \frac{du_c}{dt} + \omega_0^2 \cdot u_c = 0$$

$$x^2 + 2\delta x + \omega_0^2 = 0$$

$$x_{12} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

On sait que les états suivants peuvent se présenter :

1) $R_E = 0; \delta = 0$ 2 racines imaginaires confondues - pas d'amortissement.

$$\frac{1}{2} C_1 U_m^2 \leftrightarrow \frac{1}{2} L_1 I_m^2$$

2) $R_E \neq 0 \quad \delta > \omega_0$ 2 racines réelles. Mouvement aperiodique.

3) $R_E \neq 0 \quad \delta < \omega_0$ 2 racines imaginaires conjuguées.

Mouvement oscillatoire amorti

$$u_c = U_o e^{-\delta t} \left(\cos \omega t + \frac{\delta}{\omega} \sin \omega t \right)$$

$$i = -C \frac{du_c}{dt} \quad (\text{décharge de } C_1)$$

Lors de la construction du transformateur Tesla, on s'impose les conditions mentionnées sous 3), ce qui permet d'obtenir des trains d'ondes HF de l'ordre de 20 à 100 kHz environ.

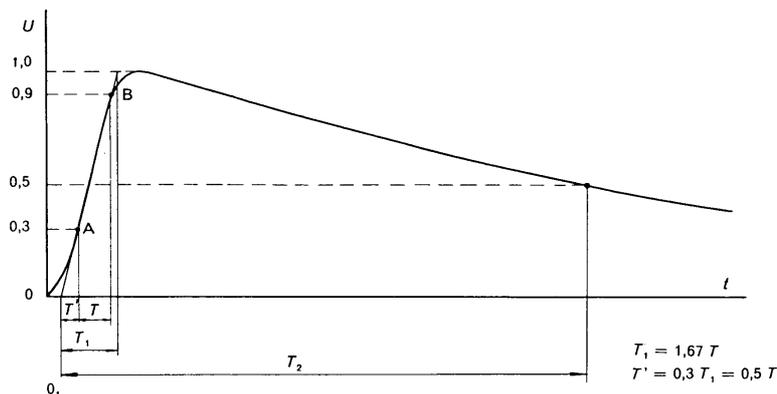
5.4 Essais de choc

L'essai de choc consiste à appliquer une onde unidirectionnelle, en général de forme normalisée, à l'objet à essayer. Elle simule un coup de foudre tombant sur le réseau.

Caractéristiques de l'onde normalisée

Essais de tenue au choc de foudre

La CEI définit la **tension** de choc normalisée suivante [3], figure 5.4-1 :



Les valeurs et tolérance sont les suivantes :

Tension de crête :	tolérance	$\pm 3 \%$
T1 :	1.2 μ s	$\pm 30 \%$
T2 :	50 μ s	$\pm 20 \%$

En pratique, on mesure T sur l'oscillographe et l'on calcule $T_1 = 1.67 T$. Le point "0₁" est l'origine conventionnelle de l'onde. On peut également calculer la raideur "S" du front :

$$S = \frac{\text{Val de crête}}{T_1} \quad [\text{kV} / \mu\text{s}]$$

On réalise également des ondes de courant de choc pour l'essai des parafoudres; la forme d'onde est identique à la figure ci-dessus et les valeurs normalisées sont les suivantes :

Courant de crête :	tolérance	$\pm 5 \%$
T1 :	4 ou 8 μs	$\pm 10 \%$
T2 :	10 ou 20 μs	$\pm 10 \%$

Les ondes ci-dessus simulent l'effet de la foudre. Pour simuler une onde de manœuvre, on utilise une onde 250/2500 μs . Pour des essais de transformateurs et d'appareillage isolés au SF₆, on utilise l'onde coupée, selon figure suivante;

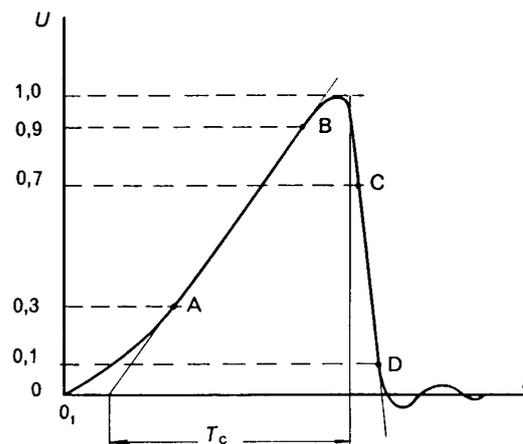


Fig. 5.4-2; onde coupée

Les dU/dt importants engendrent des contraintes diélectriques plus sévères.

Procédure d'essai

La procédure d'essai est la suivante :

Essai de tenue :

Application de 5 chocs à 100 %

- pas de décharge disruptive -> essai subi avec succès.
- plus d'une décharge disruptive -> appareil mauvais.
- une décharge disruptive -> 10 chocs supplémentaires; s'il ne se produit aucune décharge pour ces 10 chocs -> essai satisfaisant.

Couplage pour essai de choc

Exemple : essai d'un transformateur (voir aussi CEI 76)

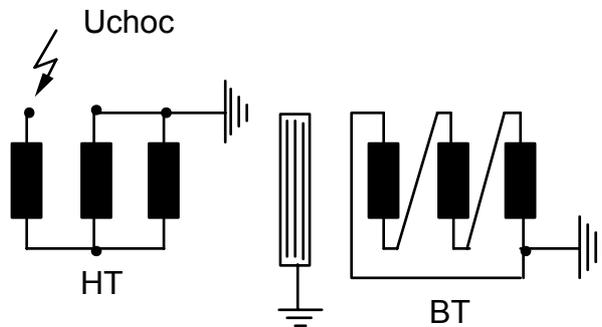


fig. 5.4-3

1 choc à 50%, contrôles

1 choc - 100%, contrôles

2 chocs -

3 chocs +

Appareil bon ou mauvais,
observer l'oscillogramme
(cf. ci-dessous)

Les cas suivants peuvent se présenter :

Onde complète,
pas de
contournement,
objet en ordre

Contournement à
environ \hat{U}

Contournement
pendant le front
d'onde

Contournement
lorsque U décroît

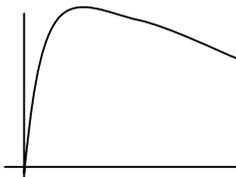


fig. 5.4-4

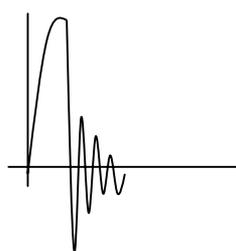


fig. 5.4-5

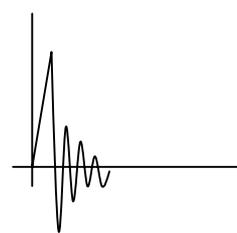


fig. 5.4-6

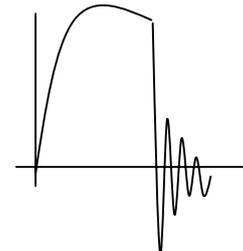


fig. 5.4-7

5.4.1. Schéma de base

Pour obtenir aux bornes de l'objet en essai une onde unidirectionnelle à front raide, on utilise généralement le schéma suivant :

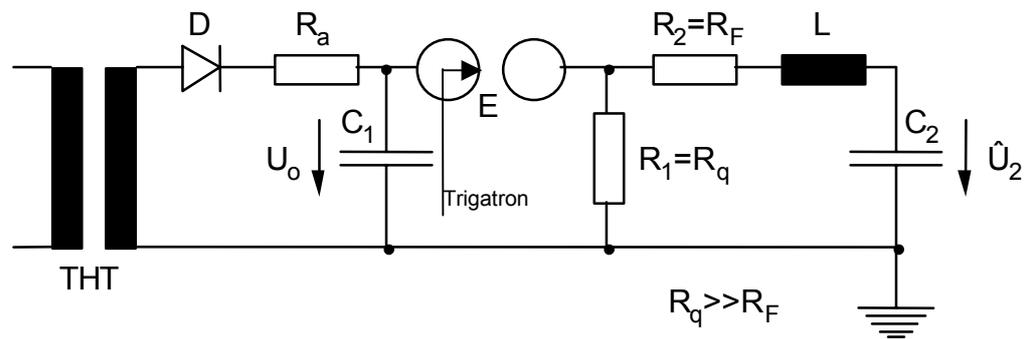


fig. 5.4-8, schéma - essai de choc

C_1 = capacité de choc (réservoir d'énergie)

C_2 = capacité de l'objet en essai + capacité du diviseur de tension

R_1 = résistance de queue d'onde (parallèle)

R_2 = résistance front d'onde (série)

L = self-inductance du circuit, due aux dimensions et composants physiques

$C_1 = (10 \div 20) C_2$

La condition d'apériodicité $R^2 > 4 \frac{L}{C}$ doit être remplie pour avoir une onde unidirectionnelle correcte.

Le condensateur C_1 se charge par l'intermédiaire du transformateur haute tension THT associé à la diode D . La résistance d'amortissement R_a empêche une charge trop rapide. Constante de temps lors du processus de charge $\tau = R_a \cdot C_1$ (τ est de l'ordre de 10 à 20 s).

Lorsque la tension disruptive U_0 de l'éclateur E est atteinte, C_1 se décharge brusquement dans C_2 au travers de la résistance de front R_2 . La résistance de queue d'onde R_1 étant beaucoup plus grande que R_2 , les capacités C_1 et C_2 vont se décharger ensuite plus lentement dans cette résistance R_1 .

On démontre que la tension aux bornes de C_2 peut être mise sous la forme :

$$u_2 = k \cdot U_0 \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right)$$

U_0 = tension de charge initiale de C_1

τ_2 = constante de temps de queue d'onde = $k_2 \cdot (C_1 + C_2) \cdot R_1$ (μs)

τ_1 = constante de front d'onde = $k_1 \cdot C_2 \cdot R_2$ (μs)

k , k_1 et k_2 sont des constantes.

On peut représenter graphiquement la tension $u_2 = f(t)$ comme indiqué par la figure ci-après:

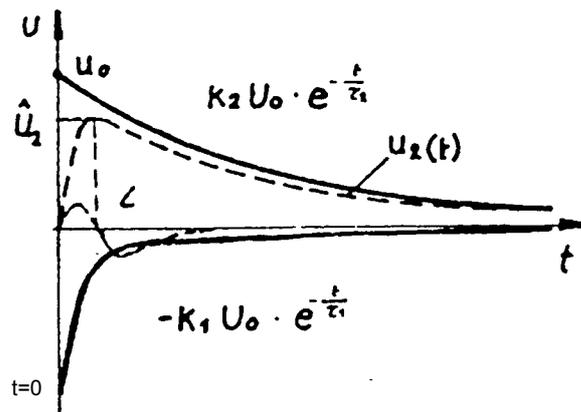


fig. 5.4-9

Il est utile de faire intervenir le rendement en tension du générateur de choc :

$$\eta_u = \frac{\hat{U}_2}{U_0} = f\left(\frac{C_2}{C_1}\right) \quad (\text{voir annexe 5})$$

Dans la pratique, on préfère, plutôt que d'employer les constantes de temps τ_1 et τ_2 , calculer le circuit en fonction des durées normalisées T_1 et T_2 du front et de la valeur de mi-amplitude de la tension de choc.

Dans le cas du schéma de la figure 5.4-8, on obtient :

a) Selon CEI :

$$\begin{aligned} T_1 &\cong 2.3 R_2 \cdot C_2 && \text{si } C_1 > 10 C_2 \\ T_2 &\cong 0.63 R_1 \cdot C_1 && \text{si } R_1 > 10 R_2 \end{aligned}$$

a) Selon VDE :

$$\begin{aligned} T_1 &\cong \frac{2}{b} \cdot R_2 \cdot \frac{C_2 \cdot C_1}{C_2 + C_1} \\ T_2 &\cong \frac{1}{a} \cdot R_1 \cdot (C_2 + C_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{avec } \frac{2}{b} &= 2,96 \text{ pour } 1,2/50 \quad \text{ou} = 1,49 \text{ pour } 1,2/5 \mu\text{s} \\ \frac{1}{a} &= 0,73 \text{ pour } 1,2/50 \quad \text{ou} = 1,44 \text{ pour } 1,2/5 \mu\text{s} \end{aligned}$$

Si C_2 et C_1 sont en μF et R_1 R_2 en Ω , on aura évidemment des temps en μs

Exemple pratique :

Le générateur de choc des Câbleries de Cossonay a les caractéristiques suivantes :

$$C_1 = 20800 \text{ pF}$$

$$C_2 = 1000 \div 5000 \text{ pf}$$

$$R_1 = 330 \times 12 = 3960 \text{ } \Omega$$

$$R_2 = \text{résistance de front max. pour la capacité de l'objet minimum} : 440 \text{ } \Omega$$

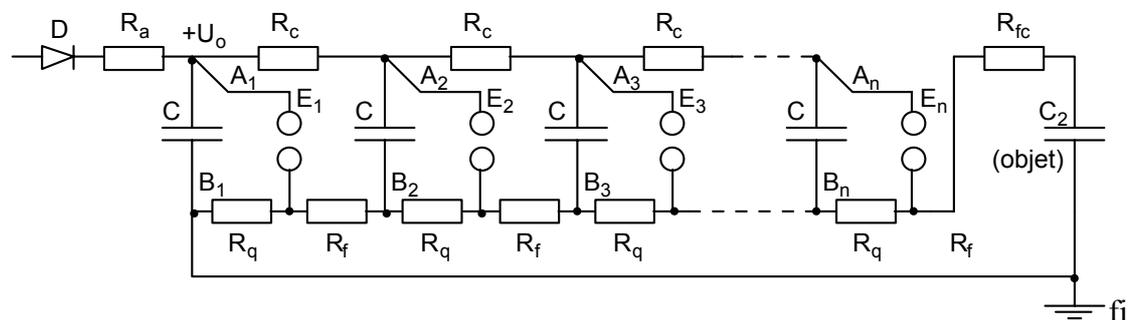
$$T_1 = 2.3 \cdot 440 \cdot 10^{-9} = 1.01 \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_2 = 0.63 \cdot 3960 \cdot 0.0208 = 52 \text{ } \mu\text{s}$$

L'onde obtenue sur un objet de 1000 pF sera bien une onde normalisée 1.2/50 μs .

5.4.2. Schéma multiplicateur de Marx

Pour obtenir des tensions de choc de l'ordre de plusieurs MV (max. réalisé env. 6 MV), nécessaires à l'essai du matériel à très haute tension, il est indispensable d'utiliser le schéma de la fig. 5.4-10.



g. 5.4-10 Générateur à n étages

Les résistances de charges R_c sont de l'ordre de 8 à 10 R_q ce qui fait qu'elles n'ont pratiquement pas d'influence sur la forme de la tension de choc sur C_2 . Pendant la période de charge des n condensateurs d'étage C , toutes leurs armatures A se trouvent au même potentiel. La chute de tension dans les résistances R_c est négligeable. Les armatures B sont au potentiel de terre par l'intermédiaire des résistances R_q et R_f . Le premier éclateur E_1 est réglé avec un écartement légèrement plus faible que celui des autres éclateurs ou dispose d'un dispositif d'amorçage (bougie).

Par conséquent, l'amorçage se produit d'abord sur E_1 , à la tension U_0 , et le potentiel de A_2 devient $2 U_0$. L'éclateur E_2 sollicité par une tension $2U_0$ s'amorce à son tour, et ainsi de suite. La tension de choc totale sera donc de la forme :

$$u_2 = k \cdot U_0 \cdot n \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right)$$

Prenons le cas du générateur de Cossonay décrit précédemment. Il comporte 12 étages avec une capacité de $0.25 \mu\text{F}$ par étage. Tension de charge : 200 kV par étage.

Pratiquement avec une capacité de charge C_2 de 1000 pF , on obtient un rendement en tension η_u de 0.92 .

Energie accumulée max. : $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_o^2$.

$$W = \frac{12 \cdot 0.25 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2 \cdot 10^6}{2} = 6 \cdot 0.25 \cdot 4 \cdot 10^4 = 6 \cdot 10^4 \text{ J} = 60 \text{ kJ}$$

Tension de choc de crête : $\hat{U} = 0.92 \cdot 12 \cdot 200 \cdot = 2200 \text{ kV} = 2.2 \text{ MV}$

5.4.3. Charge du générateur multiétage

Pendant la période de charge du générateur, on a le schéma équivalent suivant : $n = 12$ étages en parallèle

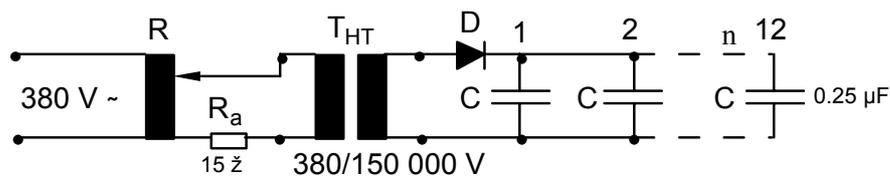


fig. 5.4-11 Cas du générateur de Cossonay

La constante de temps de charge est :

$$RC = 15 \cdot \left(\frac{150}{0.38} \right)^2 \cdot 12 \cdot 0.25 \cong 6.5 \text{ s}$$

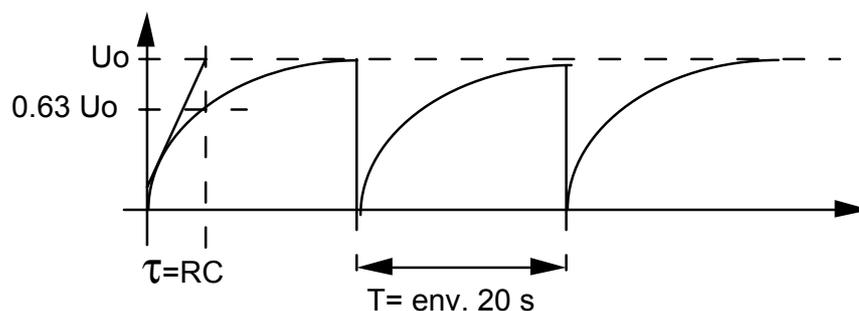


fig. 5.4-12 Diagramme de charge

On constate que le phénomène de charge du générateur a l'allure indiquée par la fig. ci-dessus. Il s'agit d'oscillations de relaxation dont l'amplitude est constante (elle dépend de l'écartement des sphères du générateur). Par contre la période T peut être réglée en agissant sur la tension de charge (autotransformateur de réglage R).

Dans la pratique, les générateurs de choc des laboratoires haute tension travaillent avec une cadence de l'ordre de 3 à 4 chocs/minute (pour l'appareillage robuste).

5.4.4. Décharge du générateur de choc

Mesure de la tension de choc.

Pour simplifier, revenons au schéma de base décrit sous fig. 5.4-1. La tension se mesure en général à l'aide d'un diviseur qui peut être, par exemple, du type ohmique ou ohmique capacitif. Le voltmètre de choc est en réalité un dispositif de mesure de la tension de crête de l'onde de choc.

Le schéma équivalent du circuit sera tel que décrit par la figure suivante:

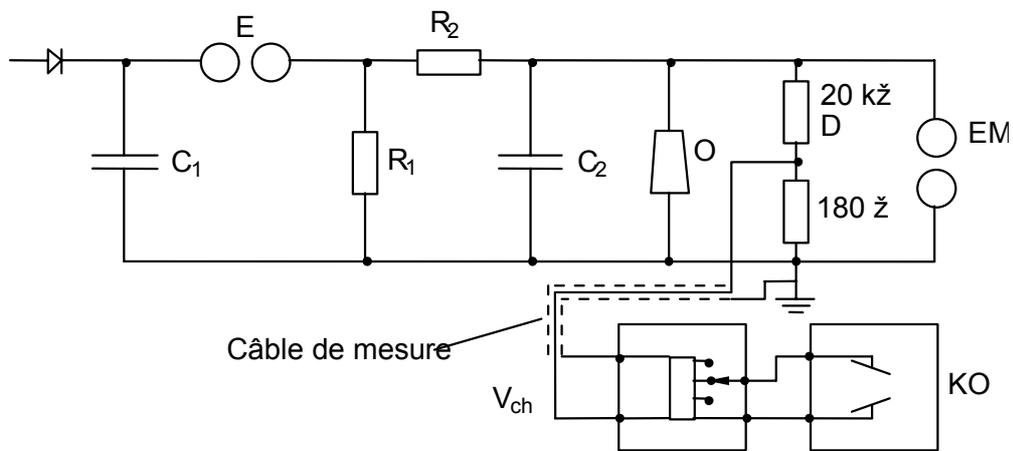


fig. 5.4-13 Ex. du générateur de Cossonay

C_1 = capacité de choc du générateur 20.8 nF

C_2 = capacité de charge de base (par ex. 1000 pF)

C = objet à l'essai (par ex. isolateur de 10 pF)

D = diviseur ohmique

EM = éclateur de mesure (pour l'étalonnage du voltmètre de choc)

KO = oscilloscope spécial de choc à grande vitesse d'inscription et haute tension de post-accélération ou oscilloscope numérique, entrée directe sans amplificateur : 1600 \hat{V} .

V_{ch} = voltmètre électronique de choc avec résistance d'adaptation au câble de mesure (par ex. 72 Ω).

On étalonne le voltmètre de choc, associé au diviseur, avec l'éclateur à sphères (voir chapitre 6). On rappelle que l'éclateur mesure bien la tension de crête de l'onde de choc.

Pour contrôler la forme de la tension de choc, on photographie / plotte / imprime l'image de l'onde sur l'écran de l'oscilloscope. On enregistre sur le même graphique une courbe d'étalonnage en temps, donnée en général par un générateur interne de l'oscilloscope. Il est alors possible de déterminer T_1 et T_2 , la durée du front et celle de mi-amplitude de notre tension de choc (procédure, cf. fig. 5.4-1).

5.5. Mesures au pont de Schering

C'est le montage classique utilisé pour la mesure des condensateurs en haute tension et pour déterminer les **pertes diélectriques** dans les isolants en général (mesure sur éprouvettes d'isolants solides, liquides ou gazeux) et des appareils complets. Une mesure des pertes diélectriques permet de contrôler la qualité de l'isolant des enroulements de machines, des câbles, des condensateurs à haute tension. Par exemple, la présence d'humidité dans un isolant au papier imprégné se traduit immédiatement par une augmentation des pertes diélectriques.

Rappel : Le diagramme vectoriel du condensateur réel est le suivant :



$$\underline{I} = \underline{U}_c j\omega C_x \Rightarrow \underline{U}_c = \frac{\underline{I}}{j\omega C_x}$$

Condensateur réel

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_r}{U_c} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{R_x I}{\frac{I}{\omega C_x}} = R_x \omega C_x$$

Représentation série

fig. 5.5-1 a) diagramme et b) schéma équivalent

Schéma du pont de Schering

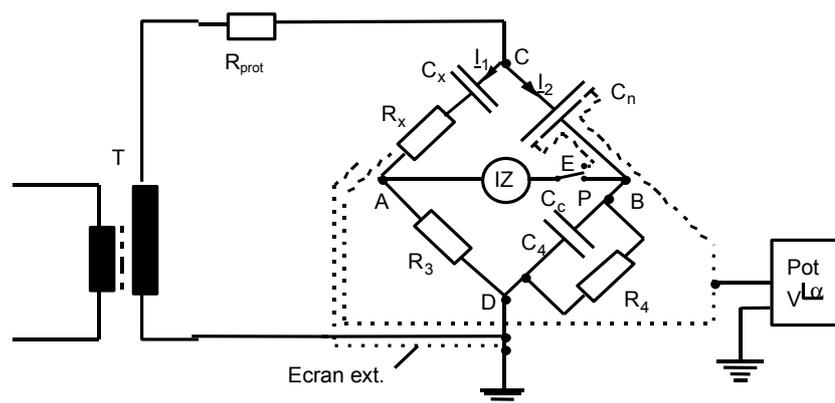


fig. 5.5-2 schéma du pont de Schering

Le condensateur à mesurer est figuré par la capacité C_x et la résistance représentative des pertes par R_x .

C_n est un condensateur étalon, (en général à gaz SF₆ sous pression) pratiquement sans pertes diélectriques ($\delta < 10^{-5}$).

R_3 est une résistance de précision (décades) alors que C_4 est constituée par des décades de condensateurs à faibles pertes (condensateurs au polystyrène). Cette capacité C_4 est shuntée par une résistance de précision R_4 , qui est parfois ajustable.

A l'équilibre, on a :

$$Z_x \cdot I_1 = Z_N \cdot I_2$$

$$R_3 \cdot I_1 = Z_4 \cdot I_2$$

$$\frac{Z_x}{R_3} = \frac{Z_N}{Z_4}$$

$$Z_x = R_3 \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_N} \cdot \frac{1}{Z_4}$$

$$Z_x = \frac{R_3}{j \cdot \omega \cdot C_N} \cdot \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_4}} \right)$$

$$R_x + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_x} = \frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_N} + R_3 \cdot \frac{j \cdot \omega \cdot C_4}{j \cdot \omega \cdot C_N}$$

En égalant les termes imaginaires entre eux ainsi que les termes réels, on obtient:

$$R_x = R_3 \cdot \frac{C_4}{C_N}$$

$$C_x = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

D'après la fig. 5.5-1 a) $\operatorname{tg} \delta_x = R_x \cdot C_x \cdot \omega$

On obtient en introduisant les valeurs ci-dessus.

$$\operatorname{tg} \delta_x = R_4 \cdot \omega \cdot C_4$$

Remarque :

En général $f = 50 \text{ Hz}$ $\omega = 100 \cdot 3.14$

Si C_4 est en μF

$$\text{avec } R_4 = \frac{10000}{\pi} (\Omega) \rightarrow \text{tg } \delta = \frac{10^4}{\pi} \cdot 10^2 \cdot \pi \cdot C_4 \cdot 10^{-6} = C_4$$

$$\text{avec } R_4 = \frac{1000}{\pi} (\Omega) \rightarrow \text{tg } \delta = \frac{10^3}{\pi} \cdot 10^2 \cdot \pi \cdot C_4 \cdot 10^{-6} = 0.1 \cdot C_4$$

L'avantage est la lecture directe de la valeur de $\text{tg } \delta$ sur la décade de C_4 , sans passer par le calcul.

Équilibrage du potentiel de l'écran du pont de Schering

Le potentiel de l'écran est contrôlé par un compensateur de phase (potentiomètre alternatif) permettant d'amener le potentiel de l'écran interne E à celui des points A et B du pont.

Le contrôle de cet équilibrage supplémentaire se fait avec l'indicateur de zéro IZ et le commutateur C_C .

Le pont de Schering industriel

Les notices, en annexe 6, montrent le schéma réalisé par la maison Tettex à Zürich pour le pont type 2801.

Le schéma-là concerne le montage avec une résistance R_3 incorporée au pont. Le courant de charge capacitif de l'objet en essai (C_X) ne doit pas dépasser 70 ou 220 mA. Pour des courants supérieurs, jusqu'à 20 A, il est nécessaire d'opérer avec une résistance R_3 extérieure au pont (schéma 2a - type 2902). Pour des courants encore plus élevés, on alimentera le shunt extérieur R_3 par l'intermédiaire d'un transformateur d'intensité de précision présentant une erreur d'angle minimale.

Exemple de pertes diélectriques

Les pertes diélectriques dans un isolant dépendent de plusieurs facteurs : intensité du champ électrique, fréquence, température, pression dans un gaz, etc. Par conséquent, la résistance représentative des pertes R_X de la figure 5.5-1 ne revêt une signification précise que pour des paramètres physiques bien définis. Le diagramme joint en annexe 7 montre l'allure pertes diélectriques dans un câble à masse de 16 kV en fonction de la température et de la fréquence.

Quelques ordres de grandeur de pertes diélectriques à la tension de service et à 20°C:

Objet	$\text{tg } \delta$
Condensateur de couplage 2 nF 100 kV	$35 \cdot 10^{-4}$
Condensateur BT au polystyrène 0.5 μF 100 V	$5 \cdot 10^{-4}$
Condensateur à gaz (CO ₂) 100 kV 100 pF	$0.5 \cdot 10^{-4}$
Câble XLPE 150 kV 300 mm ²	$3 - 5 \cdot 10^{-4}$
Câble à huile 150 kV 300 mm ²	$25 \cdot 10^{-4}$
Condensateur électrolytique	0.5

5.6 Détection des décharges partielles dans les isolants

5.6.1 Claquage par décharge

Les isolants habituellement utilisés en électrotechnique ne sont jamais parfaitement homogènes. Il existe dans le matériau des cavités de formes et dimensions diverses contenant des gaz. La permittivité du gaz de la cavité est en général plus petite que celle du matériau diélectrique qui l'entoure. Par conséquent, pour un champ électrique, E donné dans le matériau, le champ E_c dans la cavité sera plus élevé.

$$\frac{E_c}{E} = K$$

K est un facteur > 1 , qui dépend du rapport des permittivités et de la forme de la cavité. Consulter à ce sujet le chapitre 3.

Considérons une plaque diélectrique d'épaisseur d , à l'intérieur de laquelle se trouve une cavité en forme de disque plat de hauteur d_1 et d'aire A (fig. 5.6-1).

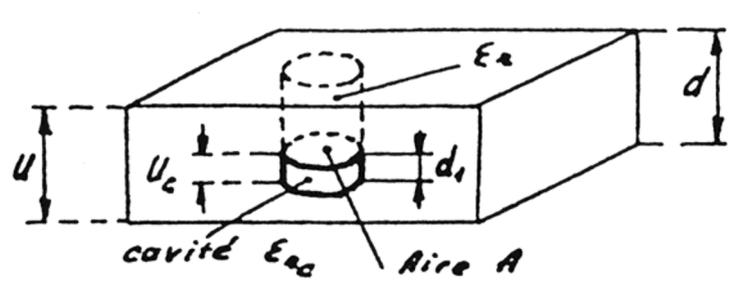


fig. 5.6-1 Cavité idéale en forme de disque plat dans un diélectrique

La capacité de la cavité est :
$$C_c = \frac{A \cdot \epsilon_0}{d_1} \quad (1)$$

On admet que le gaz à l'intérieur du disque a une permittivité relative $\epsilon_{rc} = 1$

La capacité du diélectrique voisin, d'aire A et de hauteur $d - d_1$ (cylindre idéal) est :

$$C_d = \frac{A \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{d - d_1} \quad (2)$$

dans laquelle ϵ_r est la permittivité du diélectrique.

La tension se répartit en raison de l'inverse de la valeur de la capacité (capacités en série). D'où la tension U_c aux bornes de la cavité :

$$U_c = U \cdot \frac{C_d}{C_c + C_d} \quad (3)$$

U = tension aux bornes de la plaque isolante.

En remplaçant dans (3) les capacités par leurs valeurs tirées de (1) et (2), on obtient :

$$U_c = \frac{U}{1 + \frac{1}{\epsilon r} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right)} \quad (4)$$

Exemple :

Soit une plaque d'un diélectrique d'épaisseur $d = 10 \text{ mm}$ $\epsilon r = 4$.

Hauteur de la cavité remplie d'air : $d_1 = 0.1 \text{ mm}$ ($p = 1 \text{ bar}$).

Tension sur la plaque : 20 kV , 50 Hz .

La tension aux bornes de la cavité en forme de disque sera :

$$U_c = \frac{20}{25.8} = 0.78 \text{ kV}$$

Le champ électrique moyen à l'intérieur de la cavité vaut :

$$E_c \cong \frac{U_c}{d_1} = \frac{0.78}{0.01} \cong 78 \text{ kV/cm}$$

Or, nous savons que, dans l'air à la pression atmosphérique, le champ critique (ionisation) est de l'ordre de $21 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{cm}$ ou $31 \text{ k}\hat{V}/\text{cm}$. Nous aurions donc un claquage (ou décharge partielle) dans la cavité.

Si E_c est le champ de claquage dans la cavité, la tension limite d'apparition des décharges sur la plaque sera donc :

$$U_{\text{lim}} = E_c \cdot d_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\epsilon r} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right) \right\} \quad (5)$$

puisque $U_c = E_c \cdot d_1$

Schéma électrique équivalent :

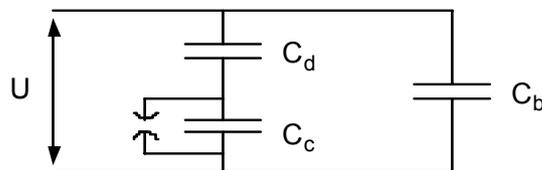


fig.5.6-2 schéma équivalent

C_c est la capacité de la cavité d'aire A.

C_d est la capacité du cylindre de même diamètre que la cavité et de hauteur $(d - d_1)$.

C_b est la capacité du reste du diélectrique environnant.

Augmentons progressivement la tension U aux bornes de la plaque jusqu'à la tension limite U_{lim} , qui correspond, dans la cavité, au champ de claquage du gaz. Par suite de la dissipation d'énergie dans la cavité, il y a neutralisation de charge sur les parois. La tension aux bornes de C_c diminue d'une petite quantité ΔU_c jusqu'à l'extinction de la décharge. Le phénomène est très rapide, de l'ordre de quelques dizaines de ns. De même par transfert de charge, sur l'ensemble C_c et C_d , il apparaît une chute de tension ΔU_b sur C_b . La diminution ΔU_c a donc lieu aux bornes de C_c et C_d ; il en résulte un transfert de charge :

$$\Delta q = \Delta U_c \cdot \frac{C_c \cdot C_d}{C_c + C_d} = C_b \cdot \Delta U_b$$

Généralement $d_1 \ll d$

par conséquent $C_c > C_d$

Il vient donc :

$$\Delta U_b \cong \Delta U_c \cdot \frac{C_d}{C_b}$$

C'est précisément la variation ΔU_b sur C_b , due à la charge de transfert Δq qui est mesurable en pratique.

5.6.2 Dispositif de mesure de la charge de transfert

On adopte le plus souvent le schéma de la figure suivante:

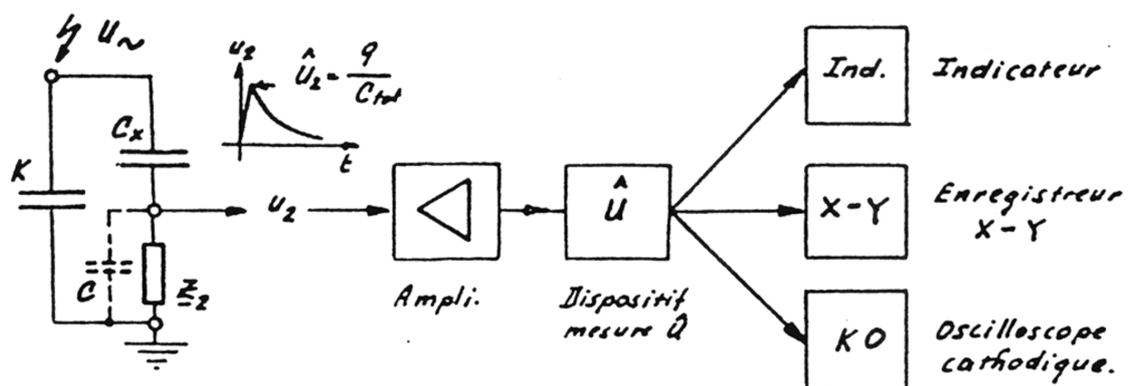


fig. 5.6-3 principe de mesure

C_x est la capacité de l'objet en essai.

K est une capacité de couplage.

C est la capacité en parallèle sur Z_2 (par ex. capacité du câble de mesure).

Z_2 l'impédance secondaire aux bornes de laquelle on mesure la tension u_2 .

On démontre que la tension u_2 apparaissant aux bornes de Z_2 est de la forme suivante, si Z_2 est purement ohmique et égale à R :

$$u_2 = \frac{q}{C_{\text{tot}}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{où } C_{\text{tot}} = \left(1 + \frac{C}{K}\right) \cdot C_x + C$$

q est la charge de transfert et

$$\tau = R \left(\frac{C_x \cdot K}{C_x + K} + C \right)$$

On constate donc que la valeur de crête de u_2 est proportionnelle à la charge de transfert q

Le dispositif de mesure électronique de u_2 comportera par exemple un amplificateur à large bande (10 à 400 kHz) associé à un mesureur de tension de crête. La sortie peut se faire, soit sur un indicateur magnétoélectrique directement étalonné en pC (picocoulomb), soit sur un enregistreur X - Y où $Y = f(q)$ et $X = f(U)$.

Un oscilloscope est en général utilisé pour repérer la position des décharges par rapport à l'onde de tension U à 50 Hz.

Remarques

Dans le cas où Z_2 est constitué par un circuit RLC parallèle, l'amplification du dispositif sera à bande étroite, par ex. 30 à 50 KHz. L'avantage d'un tel système accordé est une moindre sensibilité aux perturbations extérieures provenant soit du système d'alimentation à haute tension, soit de champs électriques perturbateurs dans le voisinage (moteurs à collecteurs, émissions radiophoniques, etc.).

Pour éviter l'effet des perturbations extérieures, on opère à l'intérieur d'une cage de Faraday. D'autre part, l'alimentation haute tension se fait par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas placé dans l'alimentation et du côté HT.

5.6.3 Mesures

Pour observer la position des décharges par rapport à la tension d'essais U à 50 Hz, sur l'écran de l'oscilloscope, on se réfère en général à une ellipse de base représentant $U \sim, 50 \text{ Hz}$:

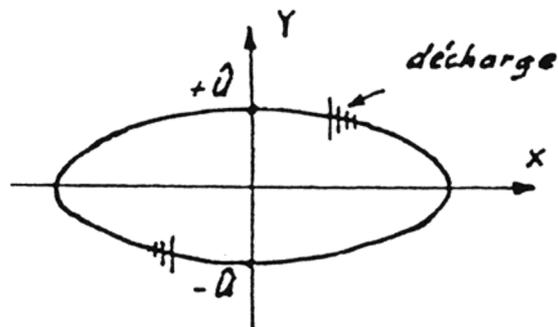


fig. 5.6-4 Ellipse de base 50 Hz

Rappel

Une telle ellipse est obtenue en appliquant des tensions U_y et U_x sur les deux paires de plaques de déviations, déphasées de $\pi/2$ l'une par rapport à l'autre.

$$u_x = U_x \cdot \sin \omega t \text{ et } u_y = U_y \cdot \cos \omega t$$

Les décharges se superposeront à l'ellipse de base à 50 Hz. Leurs positions par rapport aux crêtes de l'onde à 50 Hz peuvent varier selon le phénomène de décharge partielle en cause.

Exemple

Prenons le cas d'une traversée 40 kV, fig (5.6-5)

La tension simple de service contre masse vaut :

$$u_o = \frac{40}{\sqrt{3}} = 23.1 \text{ kV}$$

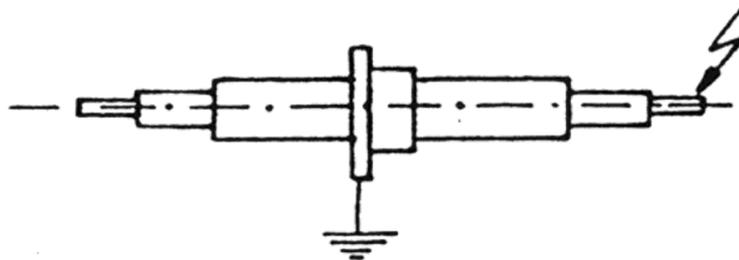
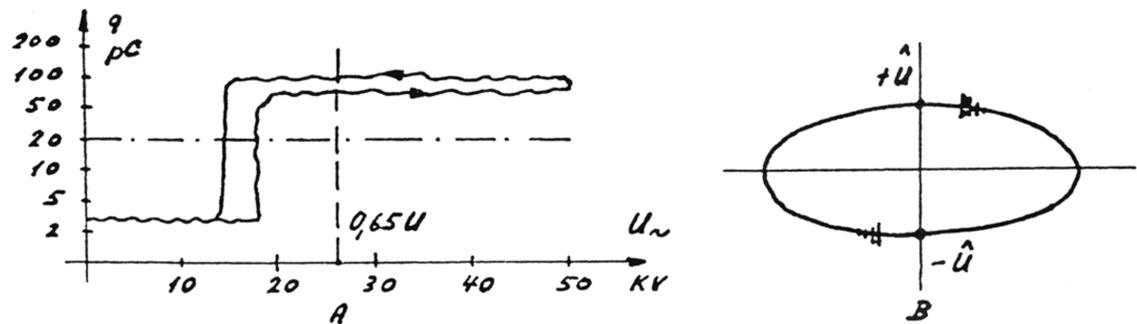


fig. 5.6-5 Borne de traversée

Le détecteur de décharges partielles associé à un enregistreur X - Y permet le relevé de la courbe $q = f(U)$ (fig. 5.6-6).



Relevé $q = f(U)$ à l'enregistreur

Oscillogramme $U = f(t)$ sur l'oscilloscope

fig. 5.5-8

Constataions

Le niveau admissible pour une telle traversée ne devrait pas dépasser 20 pC pour une tension de 0.65 U. On obtient ici un niveau de l'ordre de 100 pC. L'observation de la phase des décharges permet de constater qu'on a une décharge symétrique se produisant sensiblement sur les crêtes positives et négatives de l'onde de tension $U \sim$. On a affaire à une cavité unique dans l'isolant. La pièce sera rebutée.

Quelques ordres de grandeurs des décharges admissibles

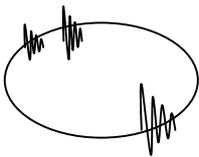
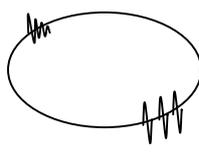
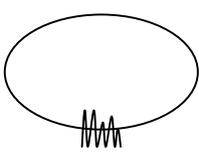
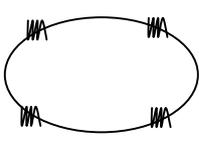
Dans la pratique, on admet actuellement les niveaux suivants :

Exemples :

Matériel	Tension d'essai U_e	Niveau admissible pour U_e en pC
Traversées en résine synthétique	$0.65 \cdot U = 1.12 U_0$	20
Transformateur d'intensité	$0.65 U$	20
Câbles à isolation polyéthylène	$0.72 \cdot U = 1.25 \cdot U_0$	5 selon CEI 2 selon les fabricants
Transformateurs de puissance		env. 100

U = tension composée, U_0 = tension simple

La notice du tableau suivant donne quelques cas typiques de décharges. Le spécialiste jugera en fonction de son expérience et des appareils qu'il connaît.

Forme des décharges	Caractéristiques des décharges	Origine
	Symétriques Stationnaires ou mobiles, parfois irrégulièrement espacées.	C'est l'image habituelle de décharges dans une cavité à l'intérieur du diélectrique.
	Asymétriques Amplitude la plus grande pour la demi-onde positive.	Décharges près de la surface d'un conducteur ou d'une électrode au potentiel de la terre.
	Asymétriques Amplitude la plus grande pour la demi-onde négative.	Décharges près de la surface d'un conducteur ou d'une électrode sous tension.
	Aux environs de la tension d'apparition des décharges, celles-ci peuvent être intermittentes.	
	Impulsions d'égale amplitude et également espacées sur la crête de la demi-onde négative de la tension.	Décharges par effet couronne sur une pointe du conducteur ou de l'électrode haute tension.
	Même type d'impulsions sur la crête de la demi-onde positive de la tension.	Décharges par effet couronne sur une pointe du conducteur ou de l'électrode à la terre.
	La première impulsion apparaît exactement à la crête de l'onde de tension. C'est un moyen utilisable pour déterminer la position de la crête de l'onde de tension sur l'ellipse. Il est préférable d'utiliser dans ce but un module de décharge.	
	Bande irrégulière constituée par un grand nombre de décharges. Amplitude mas. aux environs du "zéro" de tension.	Bruit causé par des contacts imparfaits. (semi-conducteur). Par ex. : bruit dû au papier graphité dans les câbles TT.

Chapitre VI

6. MESURE DE HAUTE TENSION EN LABORATOIRE

On utilise généralement :

6.1. Dispositifs de mesures de valeurs de crête

Des dispositifs de mesure de valeur de crête, comprenant un diviseur capacitif à la partie inférieure duquel on prélève la tension à mesurer. Le principe est expliqué en détail dans l'annexe 1.

6.2. Dispositifs de mesures de tension de choc

Des dispositifs de mesures de tension de choc, comprenant un diviseur capacitif ou ohmique, à la partie inférieure duquel on prélève la tension à mesurer. Ce dispositif diffère du premier mentionné, car il est prévu pour mesurer des ondes de choc de courte durée. (Voir également le paragraphe 5.4.4).

A noter qu'aux fréquences élevées que représente l'onde de choc, les câbles doivent être adaptés. En général, le câblage et les adaptateurs font partie intégrante du système de mesure.

De plus en plus d'appareils électroniques sont utilisés pour ces mesures.

6.3. L'éclateur à sphères

L'éclateur à sphères (une sphère à la terre) CEI publication 52 (voir en annexe 3). La tension disruptive entre les sphères suit la loi de Paschen dans les conditions usuelles d'utilisation.

Il mesure les valeurs de crête des tensions disruptives et peut s'appliquer pour la mesure:

- des tensions alternatives;
- des tensions de chocs pleines normales (valeurs différentes selon polarité);
- des tensions continues des deux polarités.

Exemple Tableau I-CEI - publication 52 - Annexe 3.

Remarques:

- Le diamètre des sphères doit être choisi en fonction de la tension à mesurer.
- Un dégagement suffisant doit être assuré autour des sphères.

- L'avantage de cette méthode est que l'on confirme la mesure de visu, avec une précision de $\pm 3\%$.

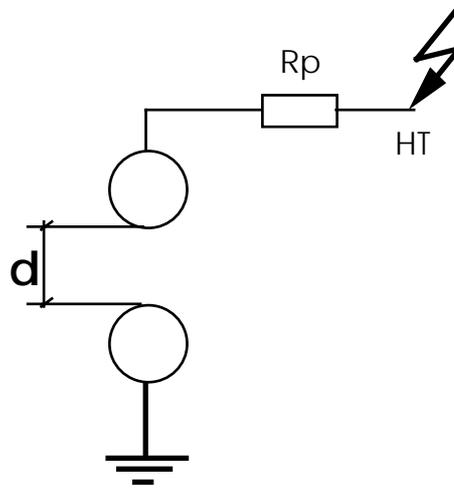


fig. 6.3-1 Principe de l'éclateur à sphères

6.3.1. Correction de la tension disruptive mesurée

Influence des conditions atmosphériques.

CEI - Publication 52 - 1960 - paragraphe 5.3.

Les tensions continues, alternatives, disruptives de choc et de tenue, etc., sont en général rapportées à la pression normalisée de 760 mm de Hg et à la température de 20° au moyen de la relation :

$$U_{760.20} = U_{b,t} \frac{760}{b} \cdot \frac{273 + t}{273 + 20}$$

$$U_{760.20} = U_{b,t} \frac{1}{0.386} \cdot \frac{T}{b} = U_{b,t} \cdot \frac{1}{k}$$

$$k = 0.386 \cdot \frac{b}{T} \quad (\text{densité relative de l'air})$$

$U_{b,t}$ = tension disruptive aux conditions du moment

b = pression atmosphérique en mm de Hg

$T = 273 + t$ t = température ambiante [°C]

6.3.2. Essai statistique de décharges disruptives à 50 % (pour essais de choc)

Cette procédure s'applique à l'utilisation de l'éclateur à sphères, par exemple pour étalonner un voltmètre de choc.

On règle la tension de manière à obtenir, pour une distance précise entre sphères :

- 10 chocs consécutifs avec
 - 5 chocs sans décharge
 - 5 chocs avec décharge

C'est à dire 50% de décharges disruptives !

La lecture doit indiquer à ce moment la tension selon CEI 52 (courbe de Paschen) avec une tolérance de $\pm 3 \%$.

Cet étalonnage se fait en général à 80% de la tension de choc pour ne pas engendrer trop de contraintes sur l'appareil en essai, si il est nécessaire pour l'étalonnage (capacité non négligeable).

Bibliographie

- [1] "Haute Tension", Volume XXII, EPFL, M. Aguet et M. Ianoz, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [2] "High Voltage Engineering", E. Kuffel et W. Zaengl, Pergamon Press.
- [3] "Hochspannungstechnik", H. Roth, Springer.
- [4] "Essais à haute tension", CEI-60.
- [5] "Recommandations pour les mesures des tensions au moyen d'éclateur à sphères", CEI 52.
- [6] "Energie Electrique", Volume XII, EPFL, Aguet et Morf, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Internet :

www.apfoudre.com

Pour en savoir plus :

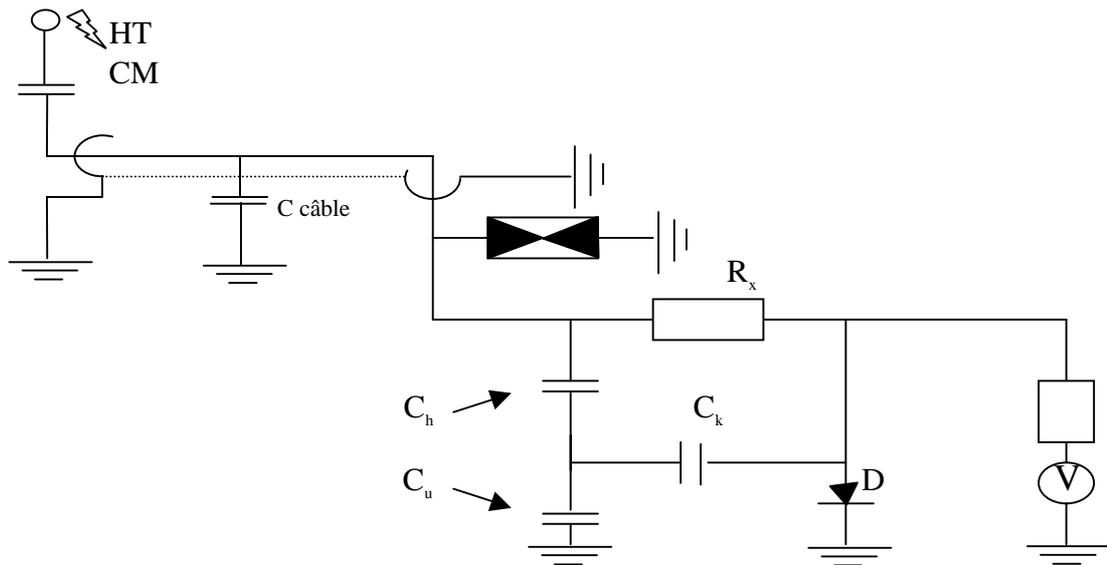
- * La foudre par Claude Gary - Masson – 2ed. 1999.
- * Installations électriques à haute et basse tension par A. Mauduit - Dunod - 1956.
- * Stromrichter - Bd II - Kübler - Teubner - Stuttgart - 1967.
- * Revue Brown Boveri - Transformateurs - no 11/12 - 1965.
- * Revue Brown Boveri - Transformateurs - no 7 - 1967.
- * Pont de Schering 2801 - Tettex Zurich.
- * Hochspannungspraktikum - E. Marx - Springer - 1952.
- * Documentation Haefely BF 701.
- * Règles pour les transformateurs ASE - 189 - 1956.
- * Berechnung des Stosskreises O. Salka, Archiv für Elektrotechnik XLI Band Heft 1 - 1953.
- * Discharge Detection in High Voltage Equipment, Dr. F.H. Kreuger Temple Pren Books LDT London 1964.
- * Erzeugung und Messungen von Hochspannungen

VDE 0433 Teil 3/4.66.
VDE 0433 Teil 6/5.63.
VDE 0433 Teil 1/1.66.
VDE 0433 Teil 2/8.61.

ANNEXES

- 1 Principe de mesure de la tension de crête**
- 2 Extraits des tensions d'essai CEI.**
- 3 Tableau des tensions d'essai CEI 52 pour l'éclateur à sphères**
- 4 Extraits de catalogues parafoudres**
- 5 Rendement du générateur de choc, courbe**
- 6 Extraits du manuel Schering-Tettex**
- 7 Variation de l'angle de perte en fonction de la température et de la fréquence**
- 8 Tables des caract. diélectriques**

ANNEXE 1 : PRINCIPE DE MESURE DE LA TENSION DE CRETE



Le condensateur de mesure CM forme, avec le câble de mesure et le condensateur inférieur C_u de l'instrument, un diviseur haute tension capacitif.

La tension de C_u est redressée par la diode D à travers le condensateur de découplage C_k , si bien qu'il apparaît en C_u une composante continue qui est appliquée et indiquée par l'instrument à cadre mobile.

Ce dispositif de mesure avec redresseur n'est pas indépendant de la fréquence de la tension alternative à mesurer. Cela provient du fait que le condensateur C_u se décharge entre 2 amplitudes de tension alternative. Ainsi, il se produit, en principe, une baisse de 1 % de l'indication à 50 Hz par rapport à celle de 300 Hz.

Afin de compenser cette gamme néfaste de fréquence, un condensateur auxiliaire C_h , dans lequel se produit une chute de tension supplémentaire de la tension alternative à mesurer, est connecté en série avec C_u . La diode D est également connectée au diviseur par l'intermédiaire de la résistance R_k .

Pour les basses fréquences, l'impédance $1/\omega C_k$ étant plus élevée que la résistance R_k , le couplage se fait par R_k , c'est-à-dire que l'on applique une plus grande tension au redresseur, tandis que pour des fréquences de mesure plus élevées, le couplage se fait par C_k et la tension appliquée est plus petite.

ANNEXE 2 : EXTRAITS DES TENSIONS D'ESSAI CEI

Voir normes CEI 71 et 173

ANNEXE 3 : ECLATEUR A SPHERES AVEC UNE SPHERE A LA TERRE

Valeurs de crête des tensions disruptives en kilovolts (tensions disruptives à 50% pour les tensions de choc) :

- Valables pour :
- les tensions alternatives
 - les tensions de choc **négligentes** pleines normales ou de plus grande durée de queue
 - les tensions continues des deux polarités

Conditions atmosphériques de référence : 20°C et 1013 millibars (760 mm Hg à 0°C)

Ecartement des sphères cm	Diamètre des sphères cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05	2,8											
0,10	4,7											
0,15	6,4											
0,20	8,0	8,0										
0,25	9,6	9,6										
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,7					
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(4,0)	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		53,0	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5					
2,0		57,5	58,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0			
2,2		61,5	63,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		65,5	67,5	69,5	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
2,6		(69,0)	72,0	74,5	75,0	75,5	75,5	75,5	75,5			
2,8		(72,5)	76,0	79,5	80,0	80,5	81,0	81,0	81,0			
3,0		(75,5)	79,5	84,0	85,0	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0		
3,5		(82,5)	(87,5)	95,0	97,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0		
4,0		(88,5)	(95,0)	105	108	110	112	112	112	112		
4,5			(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5,0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	
5,5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	
6,0				(138)	146	152	161	164	164	164	164	

Note 1. Les valeurs de ce tableau ne sont pas exactes pour la mesure des tensions de choc en dessous d'environ 10kV.

Note 2. Les valeurs entre parenthèses, relatives aux écartements supérieurs à 0,5 D, sont d'une précision douteuse.

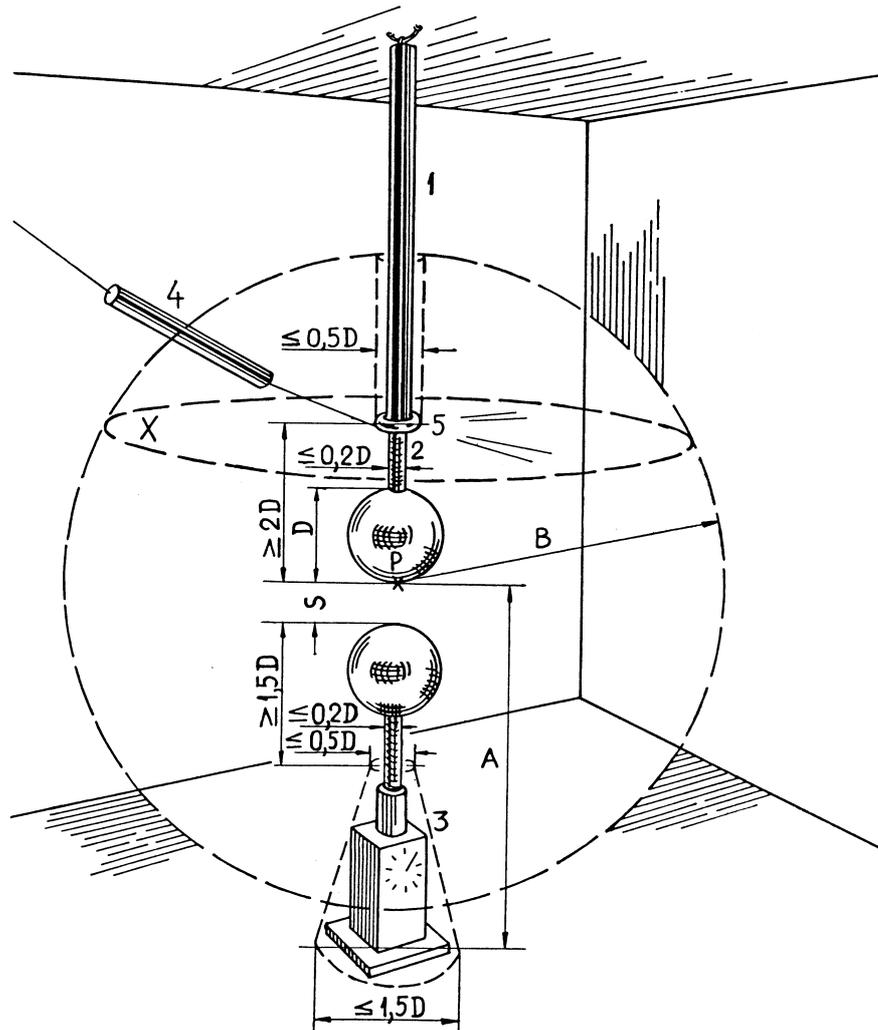


Fig.1

Eclateur à sphères vertical.

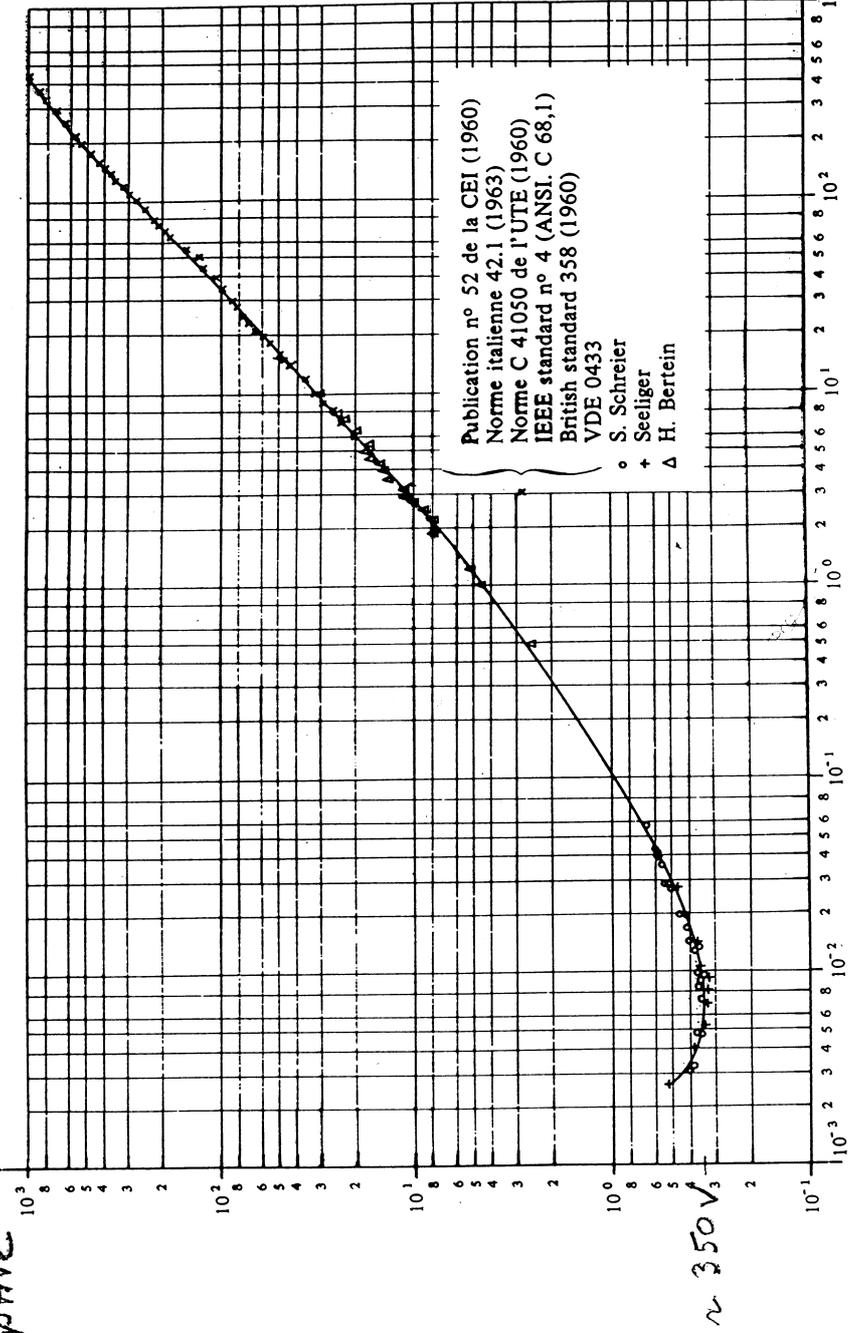
1. Support isolant.
2. Tige support de la sphère.
3. Mécanisme de manœuvre avec dimensions maximales.
4. Connexion à haute tension avec résistance en série.
5. Electrode de répartition de champ, avec dimensions maximales.
- P. Point d'étincelle de la sphère haute tension.
- A. Hauteur de *P* au-dessus du point de terre.
- B. Rayon de l'espace qui doit être dégagé de tout objet étranger.
- X. Plan que les organes du repère 4 ne doivent pas traverser à moins d'une distance *B* de *P*.

Courbe de Paschen pour l'air

U [kV]

Tension disruptive
disruptive

Tension disruptive (valeur de crête)
 U_d (kV)



CF Courbes
Valeurs
CEI 52

Produit
pression-distance
 $p \cdot d$ (bar · mm)

p : pression [bar]
 d : distance [mm]

11 Courbe de Paschen pour l'air en échelles logarithmiques. Température 20°C [262].

ANNEXE 4 : EXTRAITS - PARAFONDRES

Voir catalogue ABB N° CH-A 126 544 F

Voir catalogue ABB N° CHHOS-AR 3031 96 E

Voir catalogue ABB N° CH-HS 1061 87 F

Voir aussi les sites : <http://www.abb.com>

<http://www.ev.siemens.de/en/pegtd/index.html>

ANNEXE 5 : RENDEMENT DU GENERATEUR DE CHOC :

Teil 3-0433
Anhang

Stoßspannungen und Stoßströme

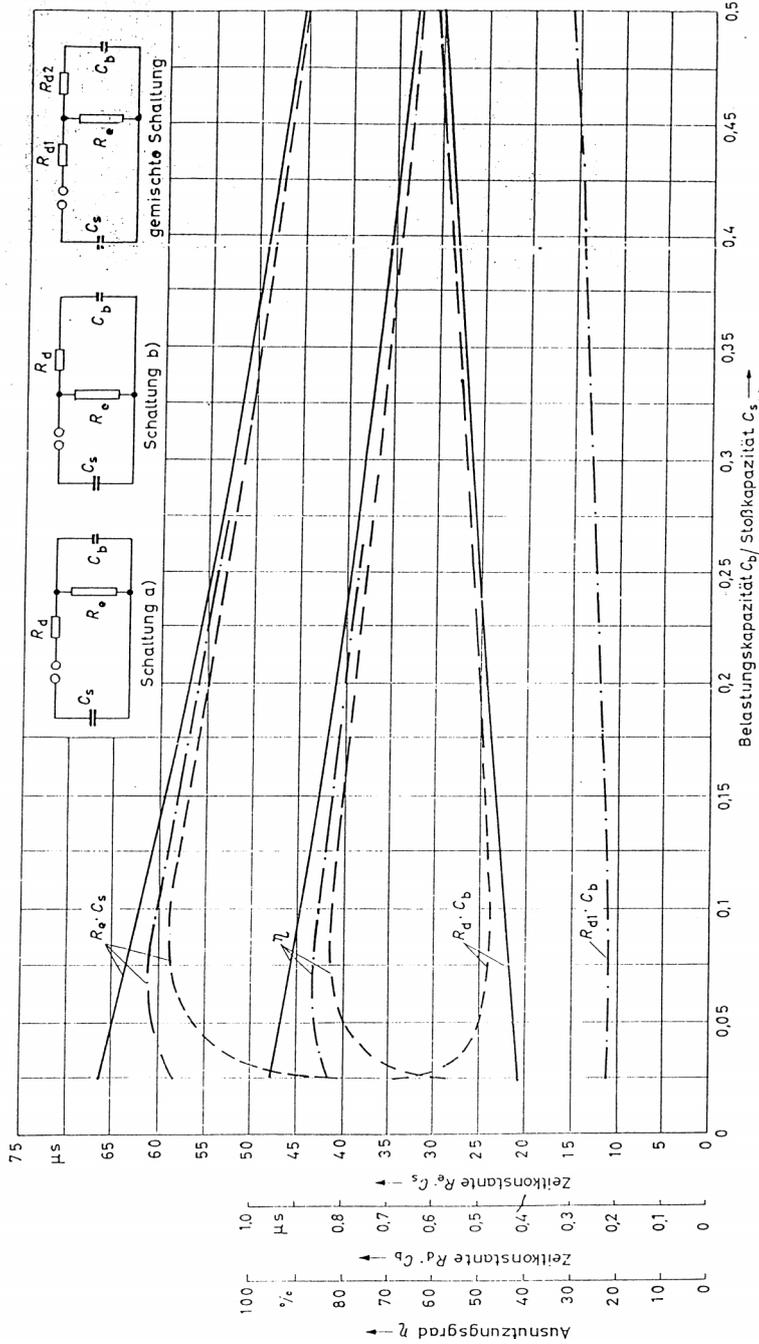


Bild 7. R_d , C_b und R_e , C_s sowie η abhängig von C_1, C_2 für die Stoßspannung 1,2/50

- Schaltung a)
- - - Schaltung b)
- · - · - gemischte Schaltung für $R_{d1} = R_{d2}$

ANNEXE 6 : *EXTRAITS DU MANUEL SCHERING-TETTEX*

Voir documentation des fabricants

ANNEXE 7 : ANGLE DE PERTE FONCTION DE LA FREQUENCE

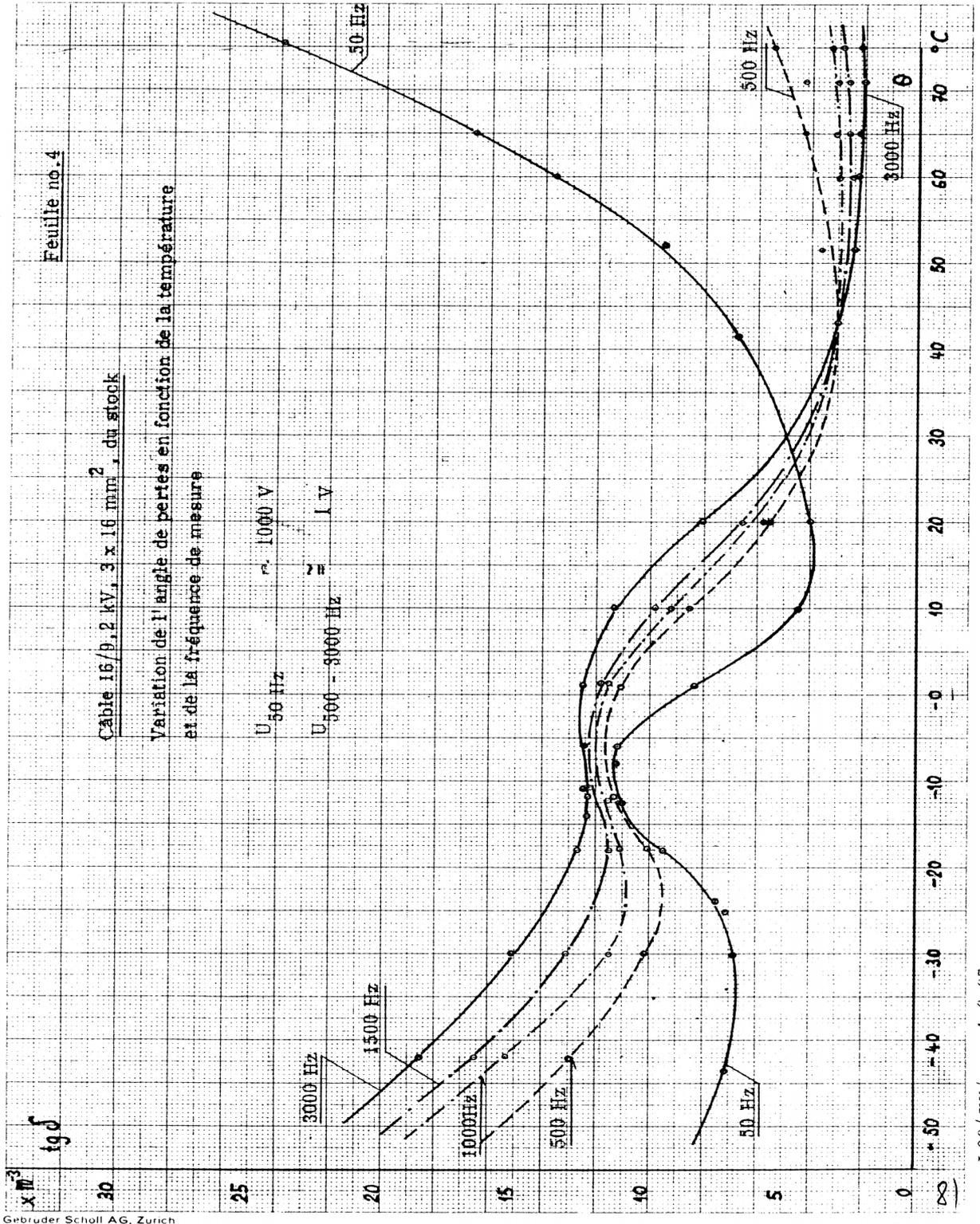
S.A. DES CABLERIES ET TREFILERIES DE COSSONAY

Feuille no. 4

Cable 16/0,2 kV, 3 x 16 mm² du stock

Variation de l'angle de pertes en fonction de la température et de la fréquence de mesure

U_{50 Hz} ≈ 1000 V
U_{500 - 3000 Hz} ≈ 1 V



Gebrüder Scholl AG, Zurich

L06/JW/mm 1.6.67

41359 - 1

ANNEXE 8 : CARACTERISTIQUES DIELECTRIQUES DE DIFFERENTES MATIERES

Matière	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [- 10^{-3}]	Champ disruptif [kV/mm]
Porcelaine	5 à 6,5	17 à 25	34 à 38
Steatite	5,5 à 6,5	2,5 - 3	20 - 30
Papier	4 - 7	20 - 100	30 - 60
Papier imprégné	4 - 4,3	5 - 10	50 - 60
Résine Epaxi	2,8 - 5	3 - 10	20 - 40
Polyester	3,5 - 5	3 - 5	20 - 29
PVC	4 - 5	50 - 80	15 - 50
PE, XLPE	2,3 - 2,4	0,2 - 0,3	20 - 60
Caoutchouc	2,5 - 5	2 - 6	20 - 30
Huile minérale	2,2 - 2,6	< 10	20 - 30
Verre	3 - 6		15 - 20
Mica	6 - 6,6		40 - 60
Air	1		3 - 3.1

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$$