

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

Université Abderrahmane MIRA

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

*COURS*

# *Métrieologie en Haute Tension*



*Par:*

*Dr. Nacéra ROUHA*

## ***Objectif de la matière***

*L'objectif de la matière est d'enseigner aux futurs diplômés en Master Electrotechnique options réseaux électriques et Electrotechnique industrielle, les différentes méthodes de mesure et de détermination des grandeurs haute tension.*

*Apprendre à l'étudiant comment mesurer les grandeurs électriques haute tension en toute sécurité, c'est le former à la maîtrise des procédures de mesure, complétées par le bon choix de la méthode de mesure spécifique à chaque cas considéré.*

*Dr. Nacéra ROUHA*

	pages
<b>Chapitre I ESSAIS DE RIGIDITE ET D'ISOLEMENT</b>	<b>1</b>
I.1 : Objet des essais diélectriques	1
I.2 : Terminologie	1
I.3 : Influence des conditions climatiques	2
I.4 : Mesure de résistance d'isolement	4
I.5 : Essais de rigidité diélectrique	7
<b>Chapitre II MESURES DE HAUTE TENSION</b>	<b>10</b>
II.1 Voltmètre électrostatique	11
II.2 Eclateurs à sphères (spintermètre)	12
II.3 Méthode du Kydonographe (figure de Lichtenberg)	20
II.4 Méthode du courant capacitif redressé	21
II.5 Mesure galvanométrique	22
II.6 Les diviseurs de tension	23
a- Diviseur résistif	24
b- Diviseur capacitif	29
c- Diviseur mixte	33
II.7 Transformateurs de mesure	34
II.8. Rappel : Réflexion et réfraction des ondes mobiles dans une ligne sans perte, non homogène	36
II.8.1. Passage d'une onde d'une ligne d'impédance $Z_1$ à une ligne d'impédance $Z_2$	36
II.9. Essais aux impulsions	38
II.9.1. Introduction	38
II.9.2. Aspect statistiques	39
II.9.3. Méthodes de détermination de la tension $U_{50\%}$ de décharge disruptive	40
II.9.3.1. Méthode des "paliers multiples constants"	41
II.9.3.2. Méthode "de montée-descente (Up and Down)"	42
II.10 Mesures de courant en Haute Tension	43
II.10.1 Méthode shunt	43
II.10.2 Bobine de Rogowski ou boucle inductive	45
<b>Chapitre III MESURE DES PERTES DIELECTRIQUES</b>	<b>47</b>
III.1 Origine des pertes et angle de pertes	47
III.2 Circuit à constantes localisées	49
III.2.1. Circuits simples	49
III.2.1.1. Représentation série	49
III.2.1.2. Représentation parallèle	51
III.2.1.3. Représentation réelle	52
III.3. Mesure de $\text{tg}\delta$ par la méthode du pont de Schering	52
III.3.1. Impédance de branche	52
III.3.2. Mesure de la constante diélectrique $\epsilon_r$	54
III.3.3. Capacité parasite	54
III.3.4. Mise à la terre des objets	56
III.3.5. Le pont à transformateur différentiel	58
III.3.6. Valeur industriel de $\text{tg}\delta$	60
III.3.7. Comportement du facteur de pertes diélectriques	60

<b>Chapitre IV</b>	<b>MESURE DES DECHARGES PARTIELLES</b>	62
IV.1.	Définition	62
IV.2.	Propriété des D.P	63
IV.3.	Schéma électrique équivalent d'une cavité dans un diélectrique solide	64
IV .4.	Méthodes de mesure des D.P	66
IV.4.1.	la détection électrique directe	67
IV.4.2.	la détection électrique indirecte	68
	• La méthode en pont de SCHERING	68
	• Détection équilibrée	69
	• Traitement électronique	70
IV.5.	Hauteur d'impulsion	72
	• Amplitude de la décharge	72
	• Dimension physique	72
	• Energie de dissipation	73
IV.6.	Localisation des D.P dans les échantillons complexes	73
	• La méthode de détection équilibrée	73
	• Localisation par ondes mobiles	74
	• Détection de la D.P par technique de déviation	76
	• Localisation des D.P. par détermination du champ électromagnétique	76
IV.7.	Ellipses de représentations des décharges partielles	77
<b>Chapitre V</b>	<b>MESURE DU CHAMP ELECTRIQUE</b>	78
V.	Mesure de champ électrique	78
V.1	La méthode directe	78
V.2	Méthodes indirectes	81
V.2.1	Méthode de Wilson (sonde capacitive)	81
V.2.2	Voltmètre rotatif (moulin à champ)	82
V.2.3	Sonde de Tassiker	84
V.2.4	Cuve rhéographique	91
V.2.5	Méthode graphique	94
<b>Chapitre VI</b>	<b>MESURE DES RESISTIVITES SUPERFICIELLES ET TRANSVERSALES DES ISOLANTS</b>	
VI.	Mesures de résistance et de résistivité	97
VI.1	Résistance transversale	97
VI.2.	Résistivité transversale	98
VI.3.	Résistance superficielle	98
VI.4.	Résistivité superficielle	98
VI.5.	Résistance de terre	99
VI.5.1	Méthode de mesure à 3 pôles	99
VI.5.2	Méthode de mesure à 4 pôles (méthode "de Wenner")	100
VI.5.3	Mesures sélectives par pince ampèremétrique	101
VI.5.4.	Mesures sans piquet de terre	102
VI.5.5.	Méthode de mesure à 2 pôles	103

# Chapitre I

## **LES ESSAIS DE RIGIDITE ET D'ISOLEMENT**

- I.1 : Objet des essais diélectriques
- I.2 : Terminologie
- I.3 : Influence des conditions climatiques
- I.4 : Mesure de résistance d'isolement
- I.5 : Essais de rigidité diélectrique

### **I.1. Objet des essais diélectriques**

Les essais de rigidité diélectrique ont pour but de :

- Déceler les défauts de fabrication d'un matériel électrique,
- Vérifier la qualité des isolants d'un matériel électrique,
- Vérifier qu'une installation électrique a été correctement réalisée,
- Contrôler la résistance d'isolement d'un matériel ou d'une installation pour en suivre l'évolution et le vieillissement.

Ils sont basés sur des mesures de résistance d'isolement et des essais de rigidité diélectrique.

### **I.2. Terminologie**

- **Ligne de fuite** : Plus petite distance, mesurée sur la surface de l'isolant entre 2 parties conductrices, nécessaire pour éviter les ruptures par contournement.
- **Courant de fuite** : Courant établi parcourant un milieu isolant soumis à une tension déterminée. Ce courant permet de quantifier la résistance d'isolement d'un matériau isolant.
- **Claquage** : Rupture instantanée des propriétés diélectriques du milieu isolant. Tout claquage entraîne une détérioration plus ou moins importante du matériau. Les essais de claquage peuvent donc être destructifs ou non.
- **Resistance d'isolement** : Caractéristique d'un matériau isolant qui, soumis à une tension donnée,

présente une résistance telle que la valeur du courant de fuite qui le traverse reste admissible.

- **Rigidité diélectrique** : Rapport entre la tension à laquelle se produit une rupture diélectrique du milieu isolant et la distance entre les deux points d'application de la tension (exprimée généralement en kV/cm).

Selon la nature du milieu isolant (solide, liquide ou gazeux) une rupture diélectrique peut être : une perforation, un contournement ou un amorçage d'arc.

- **Tension de rupture (ou de claquage)** : Tension à laquelle le milieu diélectrique perd ses propriétés isolantes et permet le passage d'un courant entre les deux points d'application de la tension d'essais.

- **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. On assiste à une décharge complète et destructive au travers de l'isolant.

Cette tension doit être évidemment plus grande que la tension de contournement de l'appareil.

- **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. L'appareil soumis à la tension d'essai ne doit présenter aucun contournement au cours des essais.

- **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.

- **La Tension de tenue à fréquence industrielle**: est 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.

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

### **I.3. Influence des conditions climatiques**

Les conditions de température, de pression et d'humidité ont une influence sur les résultats des tests diélectriques.

- **La température** : la température ayant une influence sur la densité des gaz, celle ci va modifier le comportement des isolants gazeux et liquides.

Les huiles souvent utilisées comme isolant ne sont jamais pures, la quantité de gaz dissous

augmente avec la température et va diminuer les propriétés isolantes de l'huile.

- **La pression** : la tenue en tension dans les gaz change en fonction de la pression suivant la loi de PASCHEN.

Cette loi présente un minimum de la tension de claquage pour une valeur particulière du produit de la pression par la distance, sinon, plus la pression augmente, plus la tension de tenue est élevée.

Les liquides utilisés comme isolants diélectriques sont influencés par la pression, la rigidité augmentant de façon régulière avec la pression.

Les isolants solides sont en théorie peu influencés par la pression dans la mesure où celle-ci ne modifie pas sensiblement leurs épaisseurs et leurs compositions internes.

- **L'hygrométrie** : La tenue en tension des gaz change en fonction de l'hygrométrie.

Pour l'air par exemple et pour des valeurs d'Humidité Relative < 80%, on constate que la rigidité augmente un peu avec l'accroissement de l'humidité (les molécules d'eau, plus denses que le gaz, freinent le phénomène d'avalanche).

La présence d'eau dans un isolant liquide tel que l'huile, dégrade la tenue diélectrique par électrolyse de l'eau, (formation de gaz produisant des décharges partielles conduisant au claquage).

Sous l'effet combiné de l'humidité (> 95%) et de la température (> 100°C) la plupart des polymères se dégradent.

L'eau peut occasionner des gonflements dans les isolants et créer des fissures qui favoriseront le cheminement des arcs électriques.

### Correction de la tension disruptive mesurée

Influence des conditions atmosphériques. CEI-Publication 52-1960-paragraphe 5.3.

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

$$U_{760,20} = U_{b,t} \cdot \frac{760}{b} \cdot \frac{273 + t}{273 + 20} \quad (I.1)$$

$$U_{760,20} = U_{b,t} \cdot \frac{1}{0.386} \cdot \frac{T}{b} = U_{b,t} \cdot \frac{1}{k} \quad (I.2)$$

$$k = 0.386 \cdot \frac{b}{T} \quad (\text{densité relative de l'air}) \quad (I.3)$$

$$T = 273 + t$$

$t$  = température ambiante [ $^{\circ}\text{C}$ ]

(I.4)

#### I.4. Mesure de résistance d'isolement

La mesure de résistance d'isolement est destinée à vérifier que les différents composants et sous ensembles constituant un équipement électrique ont une résistance d'isolement telle que les courants de fuite n'atteignent pas de valeurs inadmissibles.

Le principe est d'appliquer une tension continue stable et spécifiée (choisie parmi les valeurs normalisées) entre les points définis, au bout d'un temps généralement imposé, et de mesurer le courant traversant le matériau testé.

#### En appliquant la loi d'Ohm

Résistance = Tension / Courant, on exprime le résultat en donnant la valeur de la résistance d'isolement.

Cette valeur est alors comparée à la valeur de seuil minimal spécifié par la norme utilisée pour l'essai.

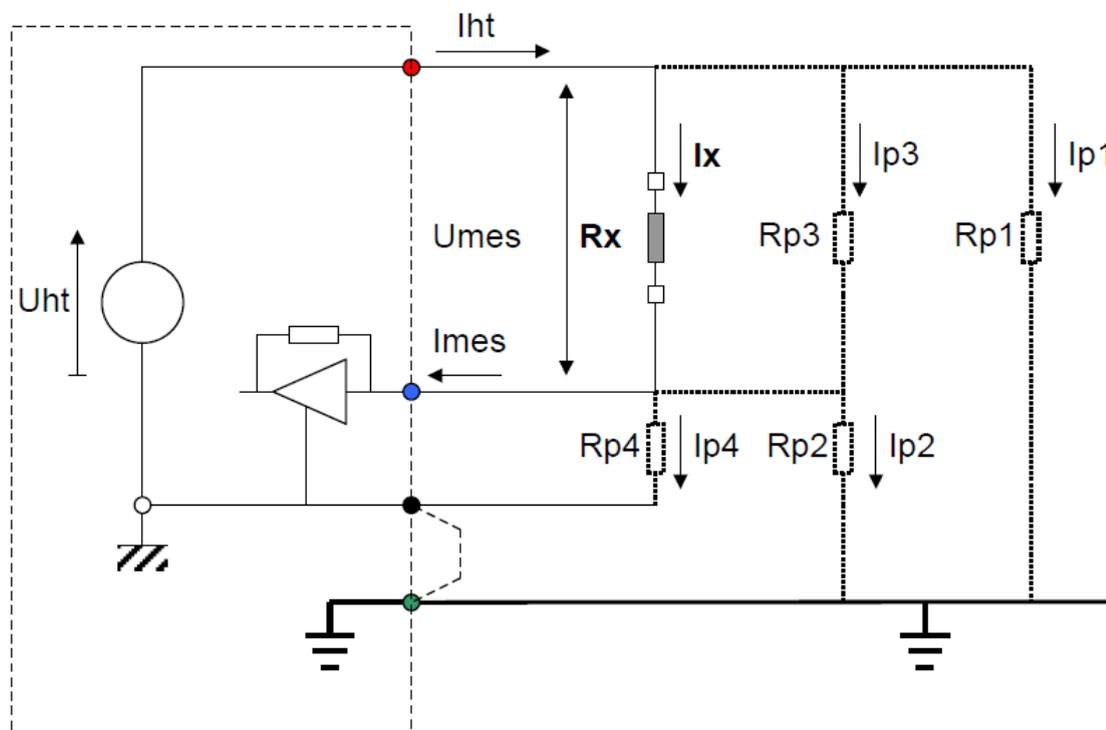


Figure I.1 : Circuit de mesure de la résistance d'isolement

### ■ Exemple de mesures sur les câbles

Les configurations de mesure de câbles sont très diverses. Les mesures doivent être réalisées soit entre conducteurs pour les câbles multiconducteurs, soit entre âme et blindage pour les câbles blindés, soit entre le câble et son environnement pour les câbles mono-conducteur.

- Dans ce dernier cas, la méthode généralement utilisée, est de plonger le touret de câble dans un réservoir d'eau (appelé piscine), de laisser l'eau pénétrer jusqu'au cœur du touret, puis d'effectuer la mesure de résistance d'isolement entre le conducteur et l'eau.

Pour des raisons de construction et de sécurité, le réservoir se trouve raccordé à la terre.

L'appareil de mesure de résistance d'isolement doit donc être capable de mesurer un échantillon dont un de ses points est la terre.

- Une autre spécificité des mesures de résistance d'isolement sur des câbles est que les caractéristiques des constructeurs donnent des valeurs de résistance pour une longueur de câble normalisée de 1 km (kilomètre).

En plate-forme lors des contrôles des tourets de câbles, ceux-ci ne font jamais exactement la longueur normalisée, ce qui oblige les opérateurs à effectuer un calcul fonction de la longueur du câble et du nombre de conducteurs en parallèle pour les câbles multi-conducteurs.

**Par exemple :** l'appareil mesure une valeur de  $10 \text{ M}\Omega$  pour un câble mono-conducteur de 10 km de long.

Sa valeur ramenée à 1 km sera donc de :

$$(R_{\text{totale}} / \text{km}) \times \text{Longueur} = 100 \text{ M}\Omega \cdot \text{Km}$$

Pour le même câble avec 10 conducteurs, la valeur pour 1 conducteur sera de  $1000 \text{ M}\Omega$  par km.

- Lorsque ces mesures sont effectuées au moyen de générateurs de haute tension (1-5kV) comportant un mégohmmètre, pour éviter la circulation des courants de fuite, on relie l'isolant au potentiel nul (0) du mégohmmètre.

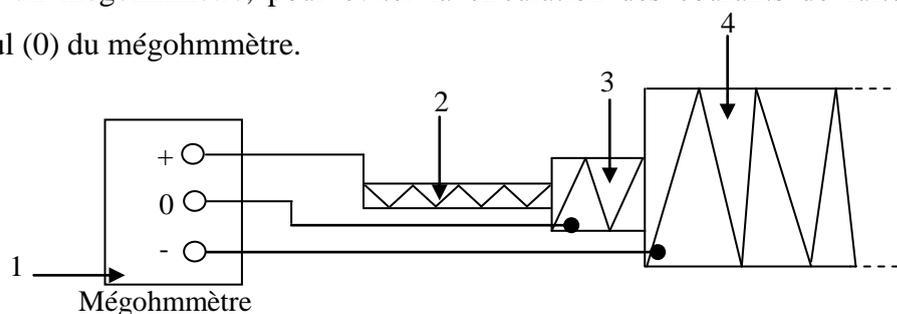


Figure I. 2: principe de mesure de la résistance d'isolement

1 : Mégohmmètre, 2 : conducteur, 3 : gaine isolante ; 4 : électrode.

La résistance d'isolement (de la figure.I.2) est la résistance existant entre le conducteur sous tension et la gaine protectrice mise à la terre (câble).

### ■ Choix de la tension de mesure

Les mesures de résistance d'isolement devant permettre de vérifier que des matériaux ou des équipements répondent aux exigences des normes, il est important de se référer à ces normes pour choisir la tension de mesure.

Les valeurs de tension normalisées sont généralement : 50, 100, 250 et 500 volts continus.

En cas d'absence de recommandation, choisir une tension de 100 volts pour effectuer les mesures.

Dans le cas de mesures sur des échantillons capacitifs et lors de l'étude de l'influence de la tension sur les valeurs de résistance d'isolement, il est important de toujours partir de la tension la plus basse et de poursuivre les mesures en augmentant la tension.

Une procédure dans l'ordre inverse pourrait donner des résultats incohérents.

### ■ Courant de fuite

Le courant de fuite, dû à l'humidité et à la pollution, doit être pratiquement nul pour avoir un bon isolement, mais généralement les isolateurs sont exposés à des impuretés d'où l'existence des courants de fuite  $I_f$ .

Le courant de décharge passe à travers l'éclateur de protection.

$$\text{Soit : } I_f = \frac{u}{R}.$$

(I.5)

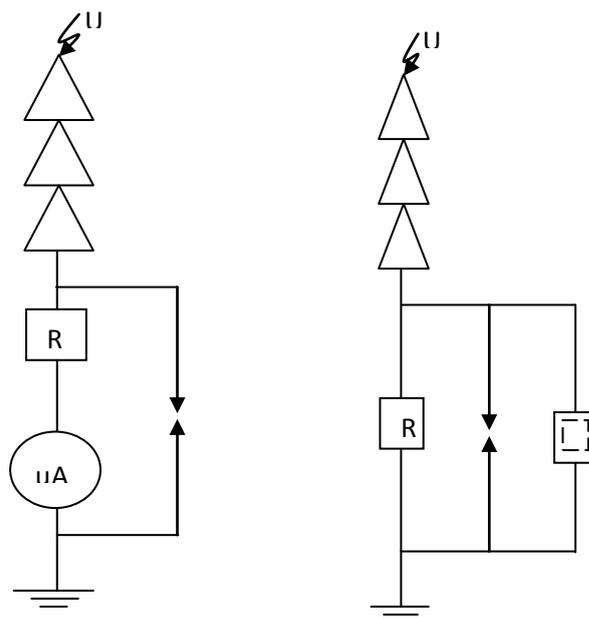


Figure VI. 5 : Principe de mesure du courant de fuite

### **I.5. Essais de rigidité diélectrique**

L'essai de rigidité diélectrique est destiné à éprouver les éléments isolants des composants et des différents sous-ensembles constituant un équipement électrique et à vérifier que les lignes de fuite, soit entre points, soit entre points et la masse, sont convenablement prévues suivant la technologie employée.

Le principe d'un essai de rigidité diélectrique est d'appliquer une tension (continue ou alternative) entre les points définis et après stabilisation de la tension de vérifier qu'il n'y a pas un courant de fuite supérieur à la valeur nominale admissible dû à des phénomènes de claquage ou de décharges disruptives (dans l'air ou dans les matériaux isolants).

La sanction de défaut est déterminée par l'analyse de la forme, de l'amplitude et du temps de maintien du courant fourni par le générateur à l'élément en test et par comparaison avec une consigne déterminée.

#### **■ Choix de la tension d'essai**

Les essais de rigidité diélectrique devant permettre de vérifier que des matériaux ou des équipements répondent aux exigences des normes, il est important de se référer à ces normes pour choisir la tension de mesure.

En l'absence d'indication concernant la valeur de tension d'essai, une règle habituelle est d'appliquer la formule suivante:

$$U_{\text{essai}} = 2 \times U_{\text{nominal}} + 1000 \text{ volts}$$

La plupart des normes spécifient la nature, alternative (50-60 Hz) ou continue de la tension d'essai.

Une règle générale est de tester l'échantillon avec une tension d'essai de la même nature que celle qui lui sera appliquée durant son utilisation finale.

#### **▪ Essais de rigidité en tension alternative**

##### **Avantage :**

- L'échantillon est éprouvé avec les 2 polarités de tension.

##### **Désavantage :**

- La plupart des échantillons testés présentant une certaine valeur de capacité, la source HT doit fournir le courant de fuite et le courant réactif, ce qui entraîne un surdimensionnement du

générateur d'où une augmentation de son prix, de son poids et une diminution de la sécurité de l'opérateur qui se trouve exposé à des courants plus élevés.

Le courant réactif peut être évalué avec la formule suivante :

Impédance = Tension / Courant (loi d'Ohm :  $Z = U/I$ )

Pour des capacités :  $Z = 1/C\omega$  avec  $\omega = 2\pi xf$  Courant réactif :  $I_r = U \times C \times 2\pi xf$

Soit par exemple :  $U = 3000$  Volts,  $C = 1$  nF ( $\approx 10$  mètres de câble blindé)

$$I_r = 3000 \times 10^{-9} \times 2\pi \times 3,14 \times 50 = 0,942 \text{ mA}$$

### ▪ Essais de rigidité en tension continue

#### Avantages

- La puissance de la source HT peut être inférieure à celle nécessaire en alternatif (poids moindre et sécurité pour l'utilisateur).
- Le courant ne circule dans l'échantillon que durant la phase de charge.

#### Désavantages :

- Le courant de charge peut faire déclencher la détection de claquage.
- L'échantillon ayant été chargé, il faut le décharger au travers de la résistance de décharge incorporée dans les appareils (1,5 MΩ).

Attention : attendre suffisamment pour que la capacité de l'échantillon se soit déchargée avant de le déconnecter de l'appareil soit d'environ 8 secondes par mF.

- L'échantillon n'est essayé que dans une seule polarité.
- La tension d'essai doit être supérieure à celle prévue en alternatif.

Une règle simple est d'utiliser le facteur de correction 1,4 (racine carrée de 2 = rapport entre la valeur efficace d'un signal alternatif et sa valeur crête) entre la tension continue et la tension alternative :

$U_{\text{continue}} = 1,4 \times U_{\text{alternative}}$ .

### ■ Sélection du mode de disjonction

Le mode de contrôle du courant de fuite le plus simple et le plus répandu est le mode de contrôle par seuil de courant ou mode  $I_{\text{MAX}}$  qui permet de fixer une limite maximale de courant circulant

dans l'échantillon sous test au-delà de laquelle l'appareil détecte une disjonction et arrête l'essai en coupant la génération de la tension et en mémorisant la valeur de celle-ci sur l'écran.

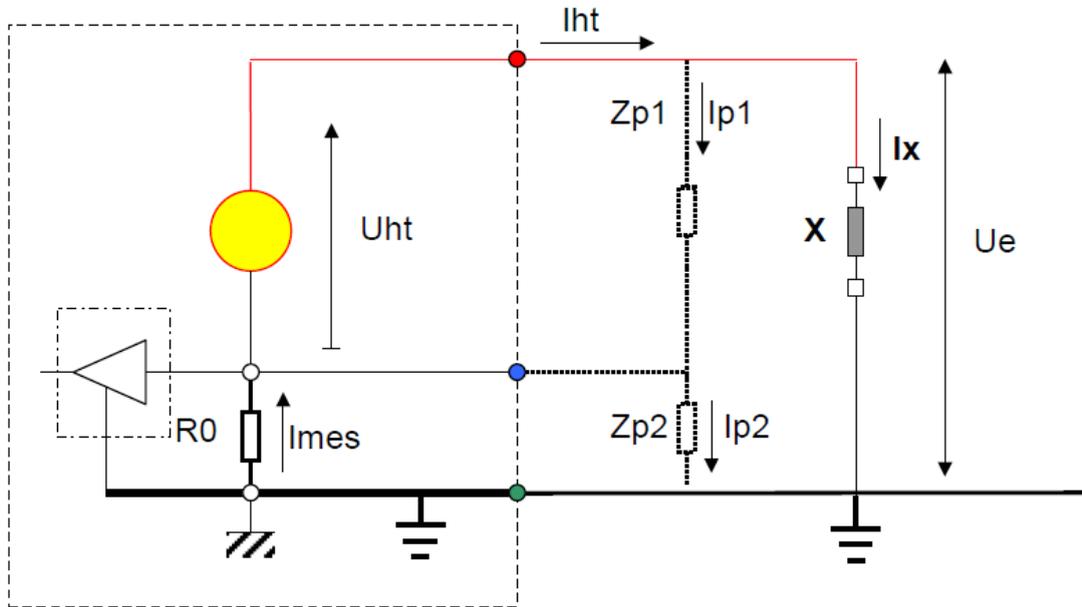


Figure I.3 : Circuit de base d'un essai de rigidité diélectrique

# Chapitre II

## MESURES DE HAUTE TENSION

- II.1 Voltmètre électrostatique
- II.2 Eclateurs à sphères (spintermètre)
- II.3 Méthode du Kydonographe (figure de Lichtenberg)
- II.4 Méthode du courants capacitif
- II.5 Mesure galvanométrique
- II.6 Les diviseurs de tension
  - a- Diviseur résistif
  - b- Diviseur capacitif
  - c- Diviseur mixte
- II.7 Transformateurs de mesure
- II.8. Rappel : Réflexion et réfraction des ondes mobiles dans une ligne sans perte, non homogène
  - II.8.1. Passage d'une onde d'une ligne d'impédance  $Z_1$  à une ligne d'impédance  $Z_2$
- II.9. Essais aux impulsions
  - II.9.1. Introduction
  - II.9.2. Aspect statistiques
  - II.9.3. Méthodes de détermination de la tension  $U_{50\%}$  de décharge disruptive :
    - II.9.3.1. Méthode des "paliers multiples constants"
    - II.9.3.2. Méthode "de montée-descente (Up and Down)"
- II.10 Mesures de courant en Haute Tension
  - II.10.1 Méthode shunt
  - II.10.2 Bobine de Rogowski ou boucle inductive

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer les hautes tensions et les courants de hautes tensions, dont les principales sont :

- Voltmètre électrostatique	U	A.C D.C.	
- Spintermetre	U	A.C D.C	Impulsionnelle
- Diviseur de tension résistif	U	A.C D.C	Impulsionnelle
- Diviseur de tension capacitif	U	A.C D.C	Impulsionnelle
- Shunt	I	A.C D.C	Impulsionnelle
- Bobine Rogowski	I	A.C	Impulsionnelle
- Courant capacitif	I, U	A.C	

**II.1. Voltmètre électrostatique**

L'appareil est constitué de 2 électrodes planes et parallèles A et B telles que le champ électrique  $E_h$ , soit homogène au droit des surfaces planes des électrodes. La pression électrostatique subit par l'électrode de mesure b, placée au centre de l'électrode B, entraîne la déviation de l'aiguille i se déplaçant sur une échelle pouvant être étalonnée directement en kilovolts. Les gammes de mesure de l'appareil se règlent en modifiant la distance d.

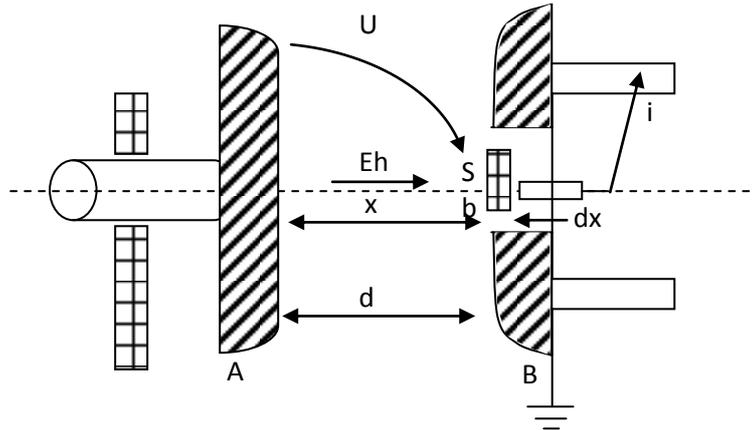


Figure II.1 : Voltmètre électrostatique

La force électrostatique due au champ électrique  $E_n$  sur l'électrode de mesure b de surface s vaut :

$$F = \frac{dw}{dx} \quad (N) \dots\dots\dots (II.1)$$

Où w est l'énergie électrostatique accumulée :

$$w = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (J) \dots\dots\dots (II.2)$$

La capacité C vaut :

$$C = \epsilon_0 \frac{s}{x} \quad (F) \dots\dots\dots (II.3)$$

La tension U est égale à :

$$U = E_h \cdot x \quad (V) \dots\dots\dots (II.4)$$

En introduisant (3) et (4) dans (2) on obtient :

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{s}{x} \cdot E_h^2 \cdot x^2 \quad (J) \dots\dots\dots (II.5)$$

En introduisant (5) dans (1) on trouve la force électrostatique :

$$F = \frac{dw}{dx} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot E_h^2 \quad (\text{N}) \dots\dots\dots \quad (\text{II.6})$$

$$\text{En continue : } |F| = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot S \cdot \frac{U^2}{d^2} \cong K \cdot U^2 \quad (\text{II.7})$$

$$\text{En alternatif : } \frac{1}{T} \int_0^T F(t) \cdot dt = \frac{\epsilon_0 S}{2 \cdot d^2} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T U^2 \cdot dt \quad (\text{II.8})$$

$$= \frac{\epsilon_0 \cdot S}{2 \cdot d^2} \cdot U_{eff}^2 \Rightarrow F_{moy} = K \cdot U_{eff}^2 \quad (\text{II.9})$$

**Avantages :**

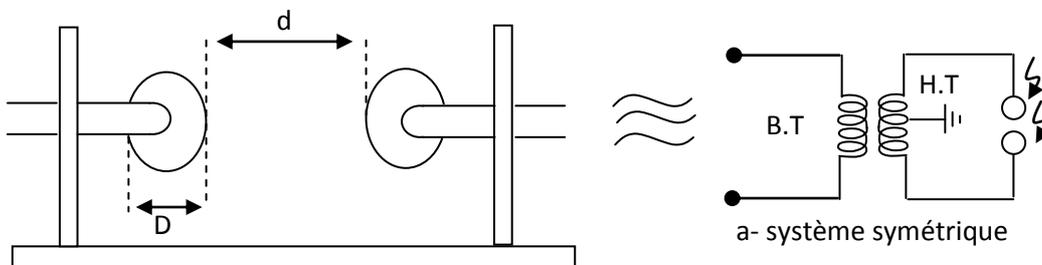
- Consommation nulle en tension continue.
- Son principe est indépendant de la fréquence, de sorte que des tensions continues et alternatives jusqu'à 100MHZ peuvent être mesurées.
- Peut mesurer des tensions jusqu'à l'ordre de 500kV
- A une grande impédance interne (résistance d'isolement de plus de  $10^{12} \Omega$  et une faible capacité de l'ordre de 10pF).

**Inconvénients :**

Très sensible aux champs électriques parasites

**I.2. Eclateur à sphère (spintermètre)**

Est formé de 2 sphères de diamètre D, isolées du sol, dont on peut ajuster l'écartement d, la mesure de la tension s'effectue au seuil de décharge disruptive, par la mesure de l'écartement des sphères et l'utilisation d'abaques liant la tension disruptive à l'écartement en fonction du type de connexion, du diamètre des sphères et des conditions atmosphériques.



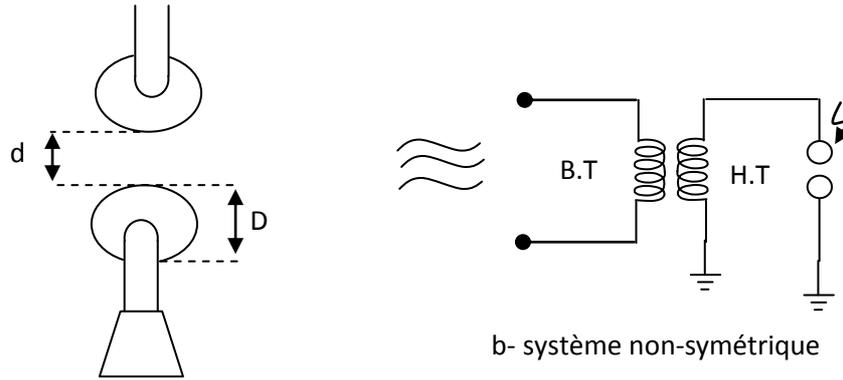


Figure II.2 : Spintermètre (a) :système symétrique, (b) : système non-symétrique

La configuration horizontale (a) est utilisée pour des diamètres  $D < 50$  cm (faible niveau de tension) et pour des grands diamètres (tensions élevées) on utilise la configuration verticale (b) avec une sphère mise à la terre.

A chaque distance "d" entre électrodes et chaque diamètre D des sphères, correspond une tension disruptive  $U_d = f(d)$ .

Le champ électrique E entre électrodes est donné par l'équation :

$$E = \beta \cdot \frac{U}{d} \text{ (V/m)} \quad (\text{II.10}) ; \quad \text{avec } \beta = f\left(\frac{d}{r}\right) \quad (\text{II.11}) ; \quad r = \frac{D}{2} \quad (\text{II.12})$$

Plus le rapport d/D est grand, plus le champ électrique devient divergent (inhomogène) et plus important sera l'influence de l'espace environnant, d'où une grande dispersion des résultats.

- Pour  $d \ll D$  ;  $\beta \rightarrow 1$  et  $E \rightarrow \frac{U}{d}$  tend à être uniforme.

- Le rapport  $\frac{d}{D}$  ne doit pas être très grand et la valeur du diamètre D des sphères doit être choisi en fonction de l'amplitude de la tension  $\hat{U}$  à mesurer, telle que :  $D \text{ (en mm)} \geq \hat{U} \text{ (en kV)}$ .

- Plus grand est le diamètre des sphères, plus important est la tension à mesurer.

On choisi généralement  $D \gg 2d$ , ou  $\frac{d}{r} = 0,2 \Rightarrow r = 5.d$ , de sorte que :

$\beta \approx 1,068$  ; Ce qui permet d'avoir des précisions de 3% et d'assimiler le champ à un champ uniforme.

- La décharge disruptive est atteinte dès qu'on ait l'ionisation complète des électrons de l'air.

- Le champ uniforme disruptif dans l'air est égal à 30 kV/cm (max) ou 21,2 kVeff/cm.

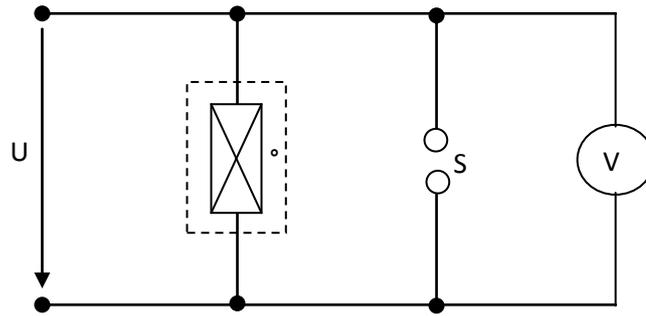


Figure II.3 Configuration d'essai: o, objet en essai; s, spintermètre; V, voltmètre

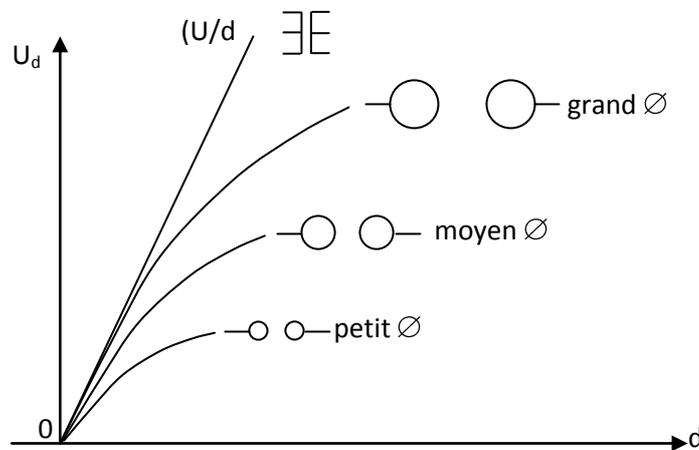


Figure II.4 : Tension disruptive  $U_d$  en fonction de la distance de l'écartement  $d$  et du diamètre des sphères  $D$

La tension disruptive  $U_d$  en fonction de la distance de l'écartement  $d$  et du diamètre des sphères  $D$  est mesurée pour des conditions atmosphériques normales de :

- Température  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  ou  $293^\circ\text{K}$
- Pression  $P_0 = 760 \text{ mmHg}$  à  $0^\circ\text{C}$  ou  $1013 \text{ mbar}$
- Humidité  $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$ .

Pour des mesures de tensions effectuées dans des conditions atmosphériques non-normales (conditions de laboratoire), on introduit des facteurs de correction atmosphériques de pression et température  $K_p$  et d'humidité  $K_h$ .

Le tableau II.1 donne les conditions d'application des facteurs de correction atmosphérique en fonction du type de tension appliquée et de la géométrie du système d'électrodes.

Tableau II.1 : Application des facteurs de correction atmosphériques

Type de tension d'essai	Forme d'électrode	Polarité	Correction de densité de l'air Exposants <i>m</i> et <i>n</i>	Correction de l'humidité	
				Facteur <i>k</i>	Exposant <i>w</i>
Tension continue		+	1,0	Fig. 10.11 (courbe b)	0
		-			0
		+			1,0
		-			1,0
Tension alternative		~	1,0	Fig. 10.11 (courbe a)	0
		~	Fig. 10.12		Fig. 10.12
		~	Fig. 10.12		Fig. 10.12
		~	Fig. 10.12		Fig. 10.12
Tension de choc de foudre		+	1,0	Fig. 10.11 (courbe b)	0
		-			0
		+			1,0
		-			0,8
Tension de choc de manœuvre		+	1,0	Fig. 10.11 (courbe b)	0
		-	1,0		0
		+	Fig. 10.12		Fig. 10.12
		-	0*		0*
	+	Fig. 10.12	Fig. 10.12		
	-	0*	0*		

▪ **Facteur de correction de pression et température**

Le facteur de correction  $K_P$  de la tension dû à la pression est défini comme suit :

$$K_P = \left(\frac{P}{760}\right)^m \cdot \left(\frac{273 + 20}{273 + T}\right)^n \tag{II.13}$$

où : P est la pression en mm Hg à 0°C.

T est la température en °C.

m, n sont des exposants donnés par des abaques.

- Pour  $d \leq 1 \text{ m}$  ;  $m = n = 1$  ;  $K_p = \delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T}$  (densité relative de l'air). (II.14)

- Pour  $d > 1 \text{ m}$  ;  $m = n < 1$  (voir abaques).

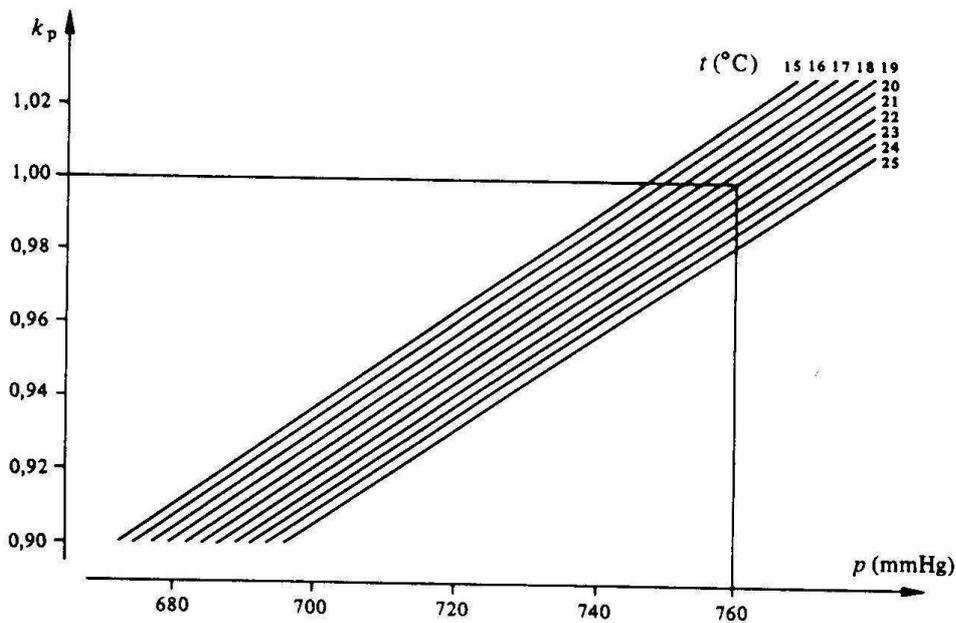


Figure II.5 : Facteur de correction  $k_p$  dû à la variation de pression P et de température T

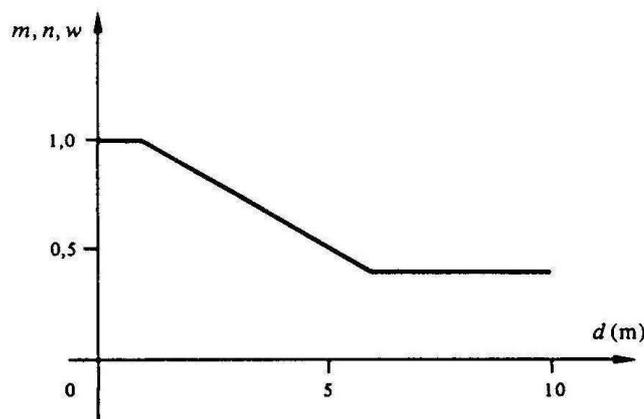


Figure II.6 : Valeurs des exposants m et n pour correction de densité de l'air et w pour correction d'humidité, en fonction de la distance d'amorçage en mètre, voir §II.2 et le tableau II.1

■ Facteur de correction de l'humidité

L'effet de l'humidité est mis en jeu en introduisant un facteur de correction de l'humidité défini par :

$$K_h = K^w \quad (\text{II.15}); \quad \text{où } K \text{ et } w \text{ sont définis par des abaques (voir figure II.6, II.7 et II.8).}$$

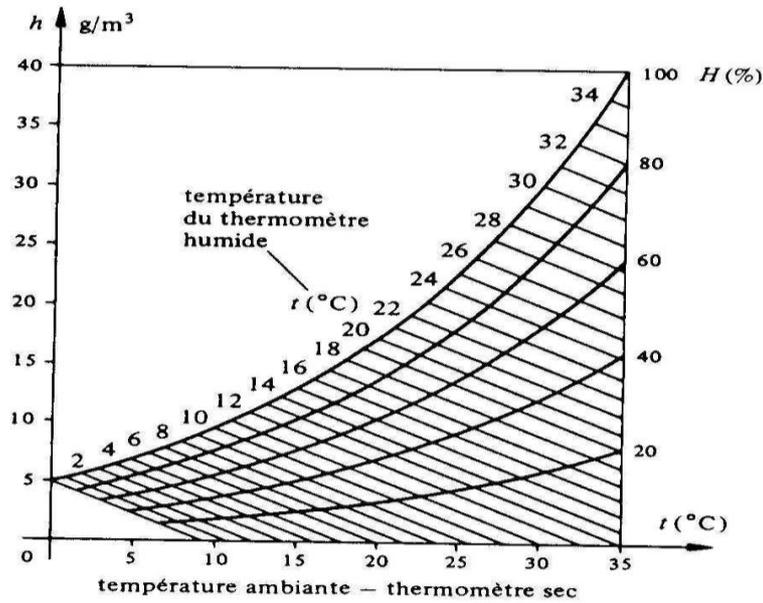


Figure II.7 : Humidité absolue de l'air en fonction des indications des thermomètres secs et humides

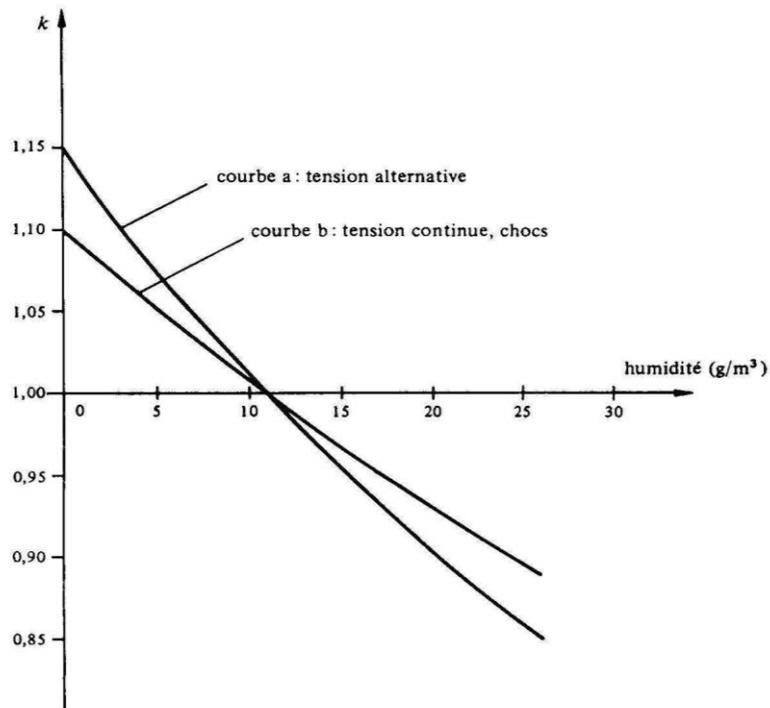


Figure II.8 : Facteur de correction k d'humidité en fonction de l'humidité absolue. Pour l'application, voir §II.2 et le tableau II.1

### ■ Correction de la tension mesurée

La relation permettant la correction de la tension en fonction des conditions atmosphériques est donnée par :

$$U (P_n . t_n . h_n) = U (P . T . h) . \frac{K_h}{K_p} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Donc } U_d \text{ mesurée} = U_{d0} . K_d \quad (\text{II.17})$$

$$\text{où } U_{d0} = \frac{U_d \text{ mesurée}}{K_d} \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Avec } K_d = \frac{U_p}{K_h} \quad (\text{II.19})$$

#### Avantages :

- Simple appareillage, utilisation universelle.
- mesure la tension de crête.
- Mesure tous les types de tension : A.C ; D.C ; e t impulsionnelle
- Large domaine d'application : de faible tension  $\cong$  kV (avec des petites sphères de quelques cm de diamètres), à des tensions élevées  $\cong$  MV (avec des grandes sphères de quelques mètres de diamètres).

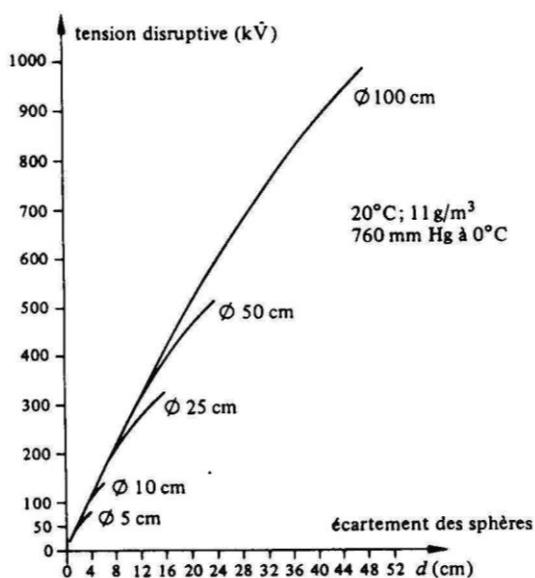
#### Inconvénients :

- Faible précision d'environ 3% pour des tensions alternatives et impulsionnelles et 5% pour des tensions continues.
- Ne donne pas une lecture directe de la tension ; nécessite l'étalonnage d'un voltmètre primaire ou des diviseurs de tension.
- Consommation importante du temps de mesure ; pour obtenir une grande précision, une longue série de testes est nécessaire pour déterminer la tension 50% de claquage.

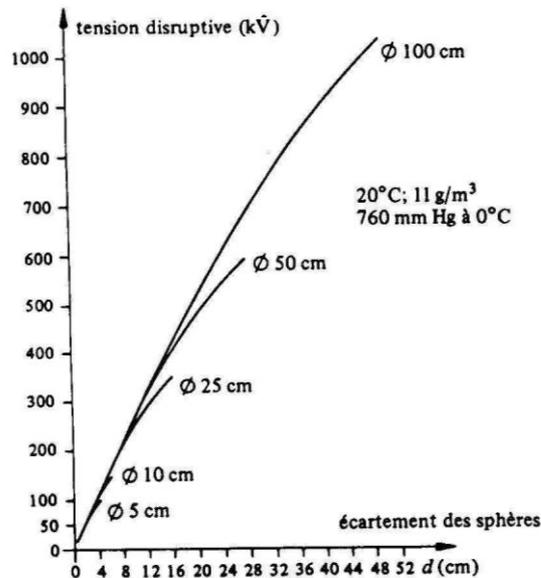
Le tableau ci-dessous présente de façon synthétique les types de correction de tensions disruptives à effectuer dans différents cas d'isolation et en fonction de l'appareillage de mesure utilisé.

Tableau II.2 : Les types de corrections à effectuer en fonction des conditions atmosphériques.

Type d'isolation	On désire connaître pour l'objet	Corrections à effectuer sur la tension mesurée au moyen du :	
		Spintermètre	Voltmètre
Isolation externe (en contact avec l'air ambiant)	Tension effective de contournement $U_C(P,t,h)$	$U_C(P,t,h) = U_C lue \frac{K_P}{K_h}$ ; $U_C(P,t,h) = U_C lue$	
	Tension normale de contournement $U_C(P_n,t_n,h_n)$	$U_C(P_n,t_n,h_n) = U_C lue$ ; $(P_n,t_n,h_n) = U_C lue \frac{K_h}{K_P}$	
Isolation interne (sans contact avec l'air ambiant)	Tension de perforation (claquage) $U_d$	$U_d = U_d lue \cdot \frac{K_P}{K_h}$	$U_d = U_d lue$



(a)



(b)

Figure II.9 : Tensions disruptives (normalisées) des spintermètres, Paramètre : diamètre des sphères

(a) : valables pour les tensions alternatives ; les tensions de choc négatives pleines, normales ou de plus grande durée de queue ; les tensions continues des deux polarités.

(b) : valables pour les tensions de choc positives pleines, normales ou de plus grande durée de queue

**II.3. Méthode du Klydonographe (Figure de Lichtenberg)**

Cette méthode permet de faire des mesures qualitatives et de distinguer la polarité (positive ou négative) de la surtension.

Ces figures correspondent à la trajectoire de charges électriques injectées ou éjectées, mises en évidence par l'arrangement des poudres isolantes colorées et préchargées par frottement entre elles.

- Cette méthode permet de mesurer les tensions de choc en fonction du rayon de la décharge.
- R est déterminée pour la plus grande distance de décharge.
- Méthode utilisée pour la mesure des tensions de choc.

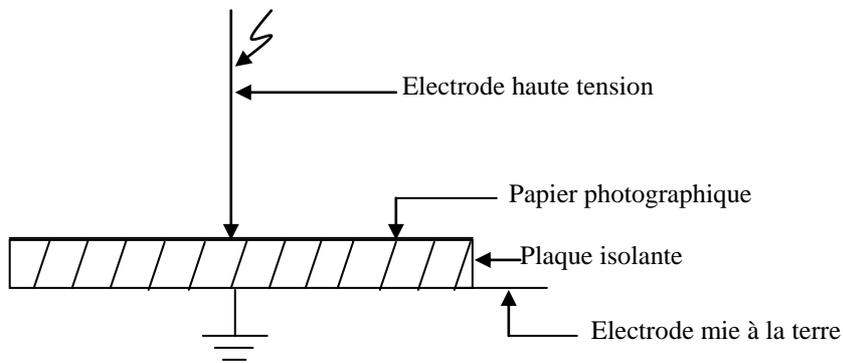
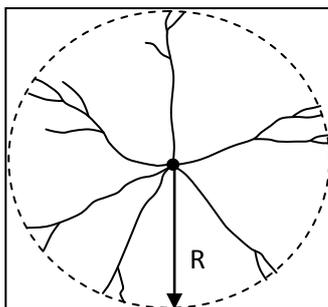
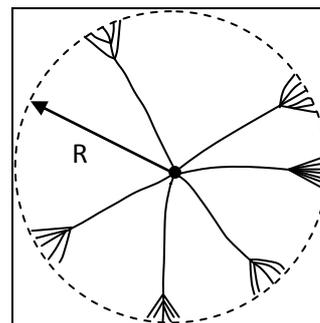


Figure II.10 : Schéma de principe de la méthode du klydonographe



(a) :  $U_+ = f(R_+)$



(b)  $U_- = f(R_-)$

$R_+ \approx (1,8 \text{ à } 2) R_-$

Figure II.11 : trajectoire de charges électriques, (a) : injectées ou (b) : éjectées

II.4. Méthode du courant capacitif redressé (tension alternative)(Chubb- Fortescue)

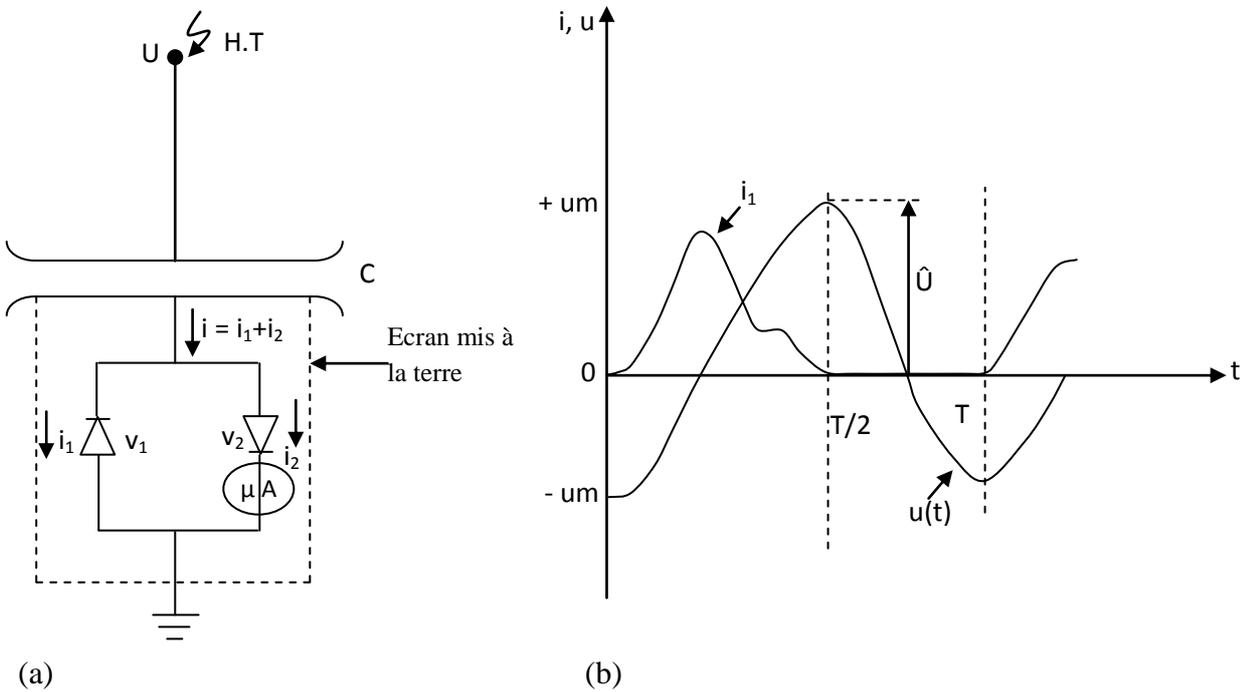


Figure II.12 : Méthode du courant capacitif redressé (a) : schéma de principe, (b) : spectres mesurés

Le courant capacitif traversera l'appareil de mesure (micro-amperamètre) pendant une demi-période ou U passe de  $-U_m$  à  $+U_m$ .

La valeur moyenne du courant est donnée par l'équation :

$$I_{moy} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} i_C \cdot dt \tag{II.20}$$

$$I_C = C \cdot \frac{dU}{dt} \tag{II.21} \quad \text{et} \quad f = \frac{1}{T} \tag{II.22}$$

$$I_{moy} = C \cdot f \cdot \int_{-U_{max}}^{+U_{max}} dU = 2 \cdot C \cdot f \cdot U_{max} \tag{II.23}$$

$$I_{moy} = 2 \cdot C \cdot f \cdot U_{max} \tag{II.24}$$

$$\text{Et } U_m = \frac{I_{moy}}{2 \cdot C \cdot f} = K \cdot I_{moy} \tag{II.25}; \quad \text{avec} \quad K = \frac{1}{2 \cdot C \cdot f} \tag{II.26}$$

Donc, il suffit d'étalonner le  $\mu A$  pour connaître la tension.

**Avantages :** Bonne précision ;

**Inconvénients :** Contrôle des courbes.

## II.5. Mesure galvanométrique

- La mesure de tension **continue** est donnée par la relation d'Ohm :

$$U = RI \quad (V) \quad (II.27)$$

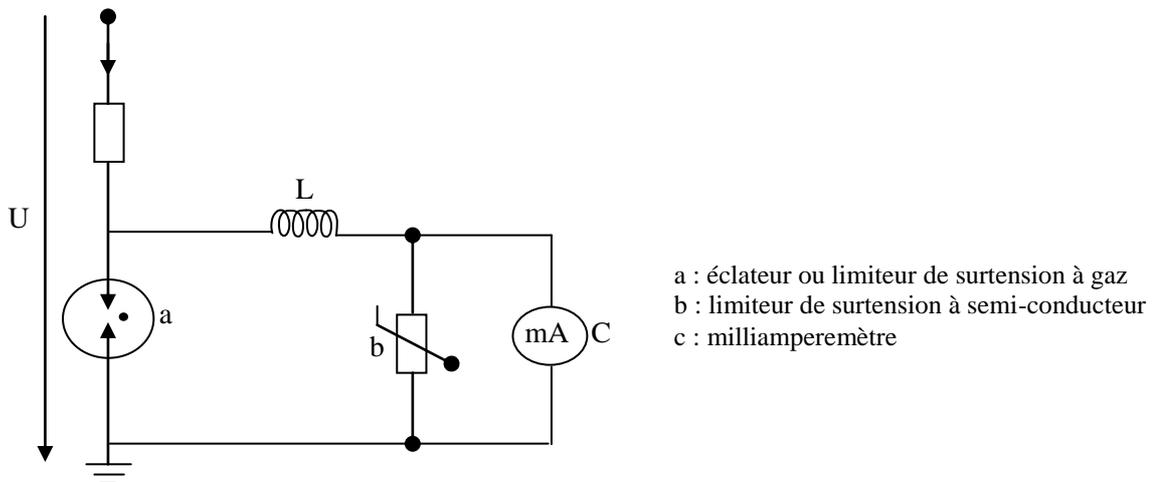


Figure II.13 : Schéma de principe de la Mesure galvanométrique.

**Avantage :**

- La mesure est fiable même en présence de champs électriques perturbateurs.

**- Inconvénients :**

- Nécessite l'utilisation de grandes résistances de l'ordre de  $1 \text{ M}\Omega$  par kV à cause des dissipations thermiques.

- Influence de la température, de l'humidité et du vieillissement sur la valeur de la résistance d'où une précision de quelques %.

- Nécessite l'introduction d'un système de limitation des surtensions en cas d'ouverture du circuit galvanométrique.

- La mesure de la tension **alternative** se fait en remplaçant la résistance  $R$  par une

capacité C.

On mesure par ce moyen la valeur efficace de la tension.

$$U = \frac{I}{w.c} \dots \dots \dots (\text{V}) \quad (\text{II.28})$$

## II.6. Les diviseurs de tension

Un diviseur de tension est un empilage de composants passifs connectés en série comportant une borne haute tension B<sub>1</sub>, une borne basse tension B<sub>2</sub> et une borne commune terre.

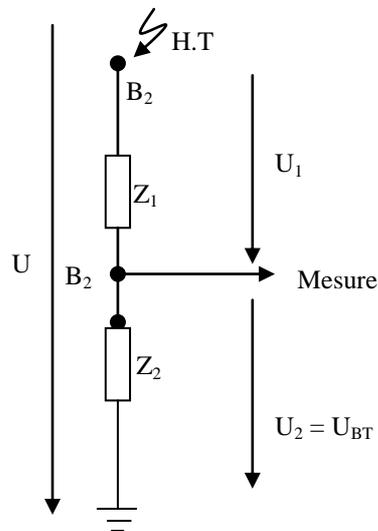


Figure II.14 : Schéma de principe du diviseur de tension

Il existe trois types de diviseurs :

- Résistif :  $Z_1 = R_1$  et  $Z_2 = R_2$
- Capacitif :  $Z_1 = C_1$  et  $Z_2 = C_2$
- Mixte :  $Z_1 = R_1 // C_1$  et  $Z_2 = R_2 // C_2$

Le schéma équivalent du diviseur de tension doit compter non seulement les valeurs des composants passifs physiques, mais aussi les éléments parasites tels que :

- La capacité contre terre  $C_{BT}$
- La contre l'alimentation H.T
- La capacité entre composants
- Les inductances

- Les résistances de fuites

Dans certains cas particuliers, ces parties peuvent être négligées.

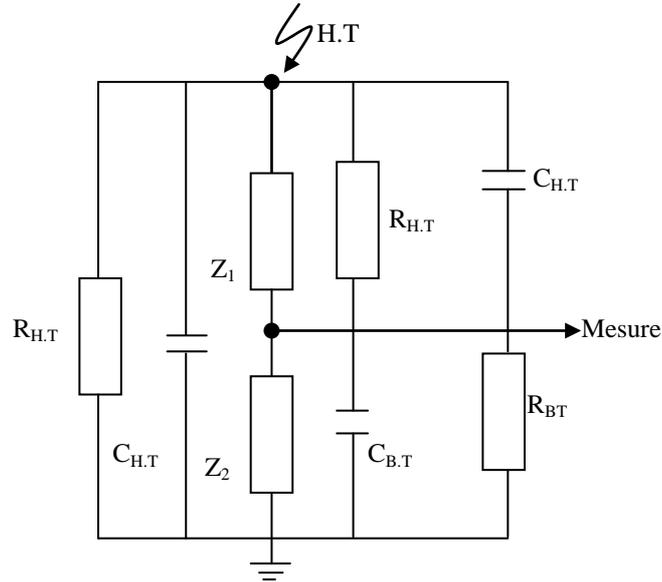


Figure II.15 : Schéma équivalent du diviseur de tension

**a- Diviseur résistif :**

Il est utilisé pour les mesures de tensions continues et de choc.

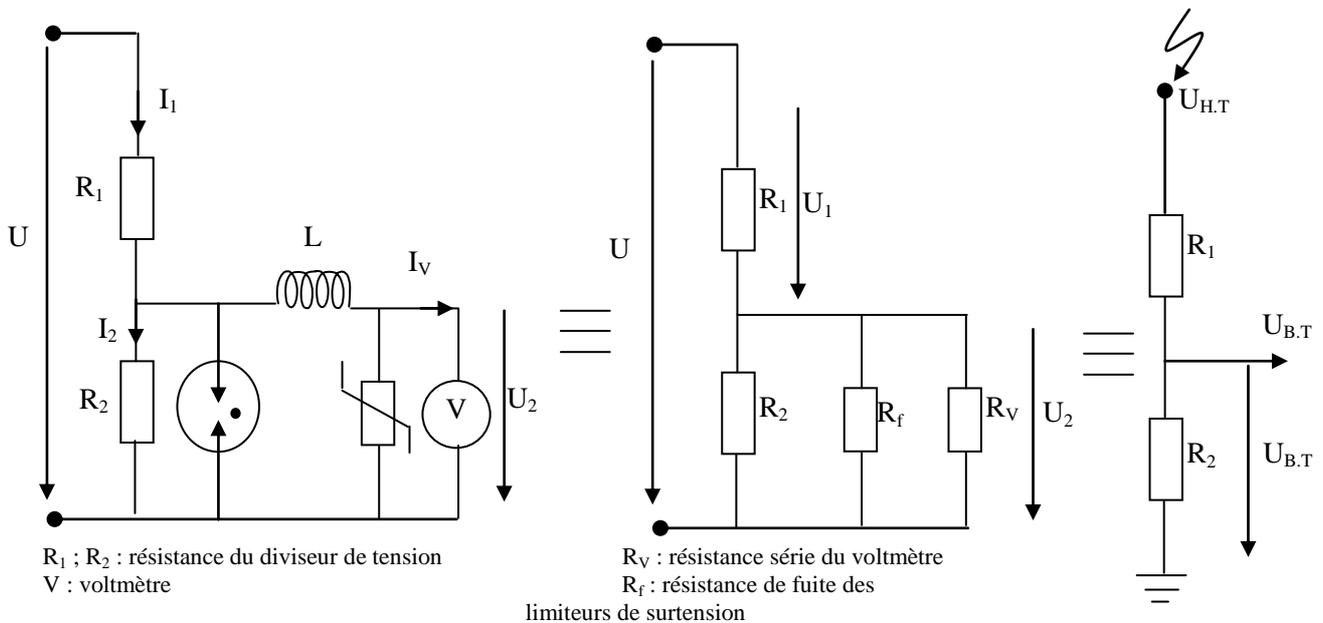


Figure II.16 : Principe de mesure du diviseur de tension et Schéma équivalent simplifié

On définit le rapport de division par :

$$g = \frac{U(t)}{U_2(t)} = \frac{R_1 + R_{e2}}{R_{e2}} \quad (\text{II.29})$$

$$\text{Avec } R_{e2} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_v}} \quad (\text{II.30})$$

Généralement,  $R_v$  et  $R_f$  sont beaucoup plus grandes que  $R_2$ , d'où :

$$g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_{e2}} \Rightarrow U_2 = U_{BT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{H.T} \quad (\text{II.31})$$

Comme  $R_1$  est aussi beaucoup plus grande que  $R_2$ , l'équation précédente devient :

$$g = \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow U_{BT} = \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{H.T} \quad (\text{II.32})$$

- **Avantages** : Les précisions sont inférieures à 1%.

\* Pour mesurer des tensions alternatives, le diviseur résistif doit comporter en plus un équilibrage capacitif. En règle générale, on évite de recourir au diviseur résistif en tension alternative car celui-ci comporte des pertes, on recourt au diviseur capacitif.

Le rapport de division  $g$  est affecté à cause de l'existence, d'une part, des capacités parasites  $C_1$  et  $C_2$  du côté haute tension et basse tension du diviseur tel que :

$$g = \frac{V_1}{V_2}$$

$$g^{-1} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} \quad (\text{II.33}) ; \text{ si } R_1 C_1 = R_2 C_2 \Rightarrow g^{-1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{II.34})$$

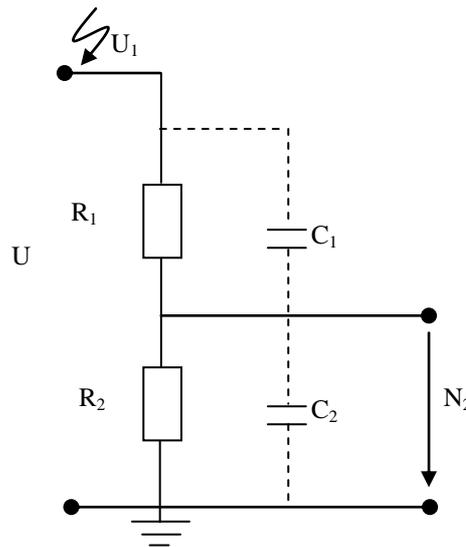


Figure II.17 : Schéma de principe du diviseur de tension avec capacités parasites

D'autre part g est également affecté par la capacité parasite  $C_t$  entre le diviseur et la terre.

$C_t$  est la capacité parasite entre le plus haut point du diviseur et la terre.

On définit la capacité parasite  $C_e \cong 0,4 C_t$  telle que :

$$g^{-1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{j\omega C + 1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot f_c \quad (\text{II.35})$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{R_1(R_1 + 2R_2) \cdot C_e}{4(R_1 + R_2)} \quad (\text{II.36})$$

Et  $f_c$  : le facteur de correction du rapport de division g (dépendant de  $\omega$ )

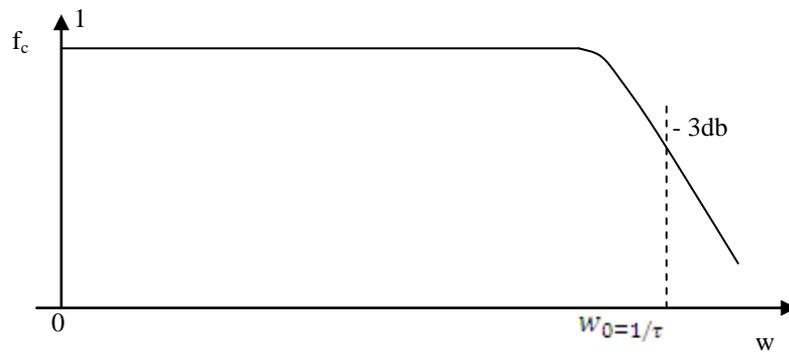


Figure II.18 : variation du facteur de correction du rapport de division g en fonction de la pulsation  $\omega$

Pour garder la bande  $f_c = 1$  aussi longue que possible, on choisit  $C_e$  très petit, tel que :  $C_e = 10\text{pF}$  et  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ , d'où  $f \cong 6\text{ MHz}$

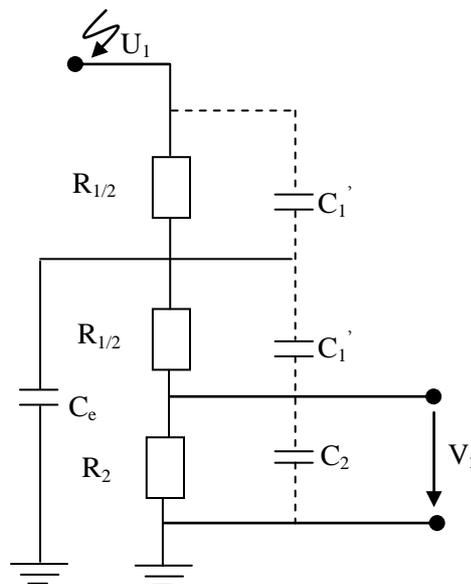


Figure II.19 : Schéma de principe du diviseur de tension avec capacité parasite  $C_t$  contre terre

On peut parer à ces capacités parasites par un blindage ou un écran d'équilibrage du potentiel. Deux techniques sont utilisées pour corriger le potentiel.

- L'électrode haute tension est entourée d'un toroïde, sphère ou de corps incurvés (fig. a).
- Le diviseur résistif est entouré de bagues de sorte que leur potentiel s'équilibre avec celui des capacités.

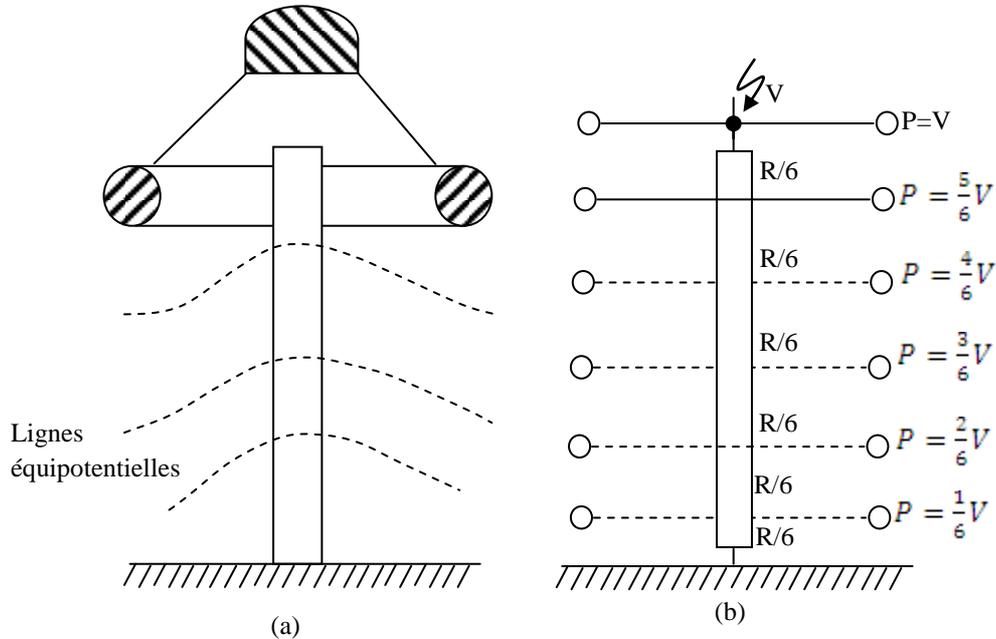


Figure II.20 : Blindage (a) et écran d'équilibrage du potentiel (b)

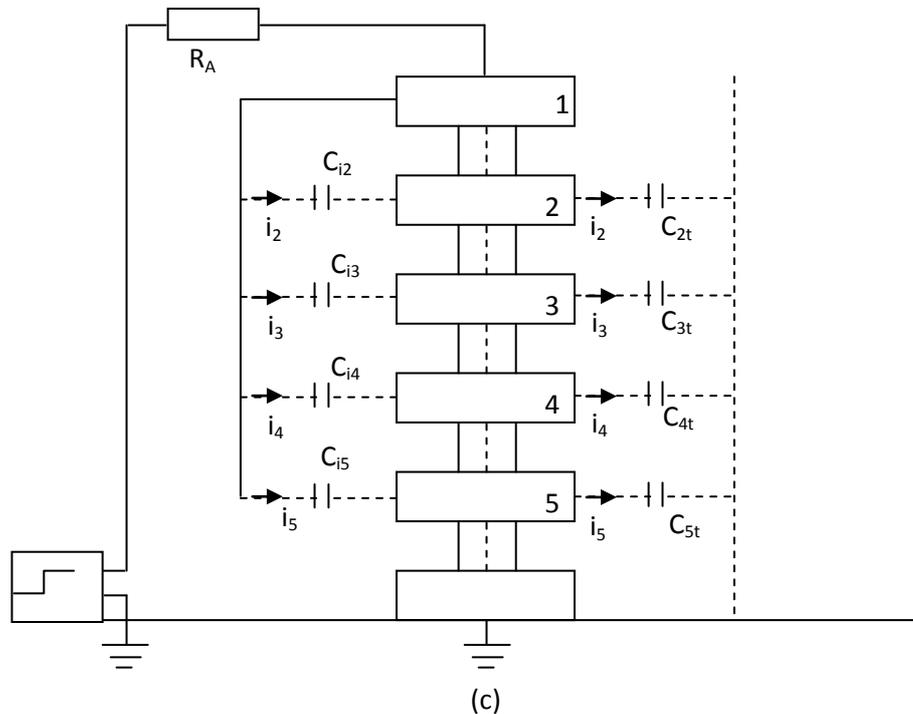


Figure II.21 : Equilibrage du potentiel par bagues

1-5 : électrodes d'équilibrage capacitif

$C_{ij}$  : Capacités équivalentes entre électrodes

$C_{jt}$  : Capacités équivalentes électrodes-terre.

(c) : Diviseur résistif muni d'écran d'équilibrage du potentiel.



Figure II.22 : Diviseur de tension 300 kV - DC, hauteur 210 m (BTP, Allemagne)

### ■ Adaptation du diviseur résistif aux tensions de choc

Dans le cas de la propagation des phénomènes de choc, on doit adapter le câble coaxial à la sortie avec une résistance  $R$  égale à l'impédance caractéristique  $Z$  du câble afin d'éviter les réflexions parasites ( $Z = 10$  à  $100\Omega$ ).  $R$  est parfois déjà inséré dans l'appareil de mesure.

De même  $R_2$  doit être si possible égale à l'impédance caractéristique  $Z$  du câble coaxial afin d'éviter les réflexions parasites.

(Voir rappel sur les ondes mobiles §II.8)

$$g = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_{e2}}{R_{e2}}; \quad \text{avec} \quad R_{e2} = \frac{R_2 \cdot Z}{R_2 + Z} \quad (\text{II.37})$$

$$\text{On a : } U_B = \frac{2R}{Z_C + R} \cdot U_{1i} \quad (\text{II.38})$$

Avec  $U_{1i} = U_A$  (tension d'onde incidente)

$$U_{1r} = \frac{R-Z}{R+Z} \tag{II.39}$$

On aura :

$$U_B = U_A \text{ et } U_{1r} = 0 \quad \text{donc } U_{\text{câble}} = 0 \text{ (câble à la terre)}$$

$$U_{H.T} = U_1 = g \cdot U_{BT} = g \cdot U_2 \approx \frac{R_2}{R_{e1}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Donc pour } U_{1r} = 0 \Rightarrow U_{2i} = U_{1i} \text{ (R = Z)} \\ \text{Pour } U_B = U_{1i} = U_A = U_{BT} \\ \text{Et } U_{\text{câble}} = 0 \end{array} \right\} \text{ pas de perte} \tag{II.40}$$

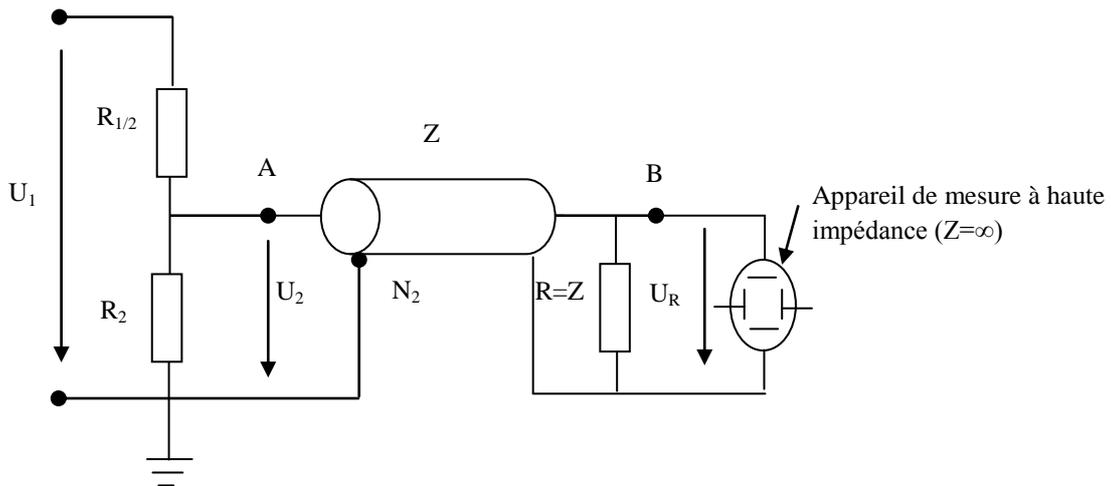
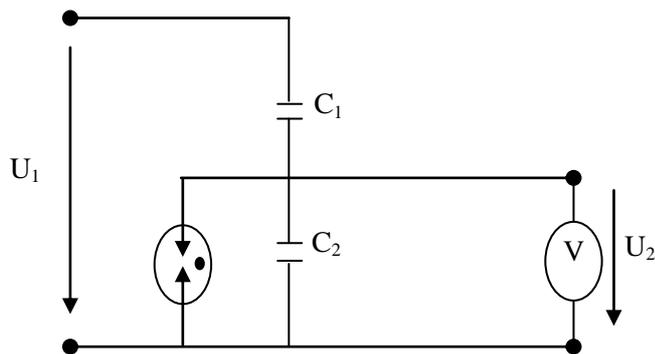


Figure II.23 : Schéma de principe de l'adaptation du diviseur résistif aux tensions de choc

**b- Diviseur capacitif :**

Il est utilisé pour les mesures des tensions alternatives et de choc de manœuvre.

Le schéma de principe d'un diviseur capacitif, en négligeant les pertes et les capacités parasites contre l'alimentation haute tension et surtout contre terre est :



Le rapport de division est :

$$g = \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (II.41)$$

Figure II.24 : Schéma de principe du diviseur capacitif

$C_1$  est un condensateur à haute tension dont la valeur de capacité est beaucoup plus faible que celle du condensateur  $C_2$  de la branche basse tension.  $C_1 \ll C_2$  implique que :  $g = \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$

Des capacités parasites contre terre de la branche à haute tension et contre la ligne d'alimentation de la branche à haute tension existent ; le schéma équivalent est représenté par :

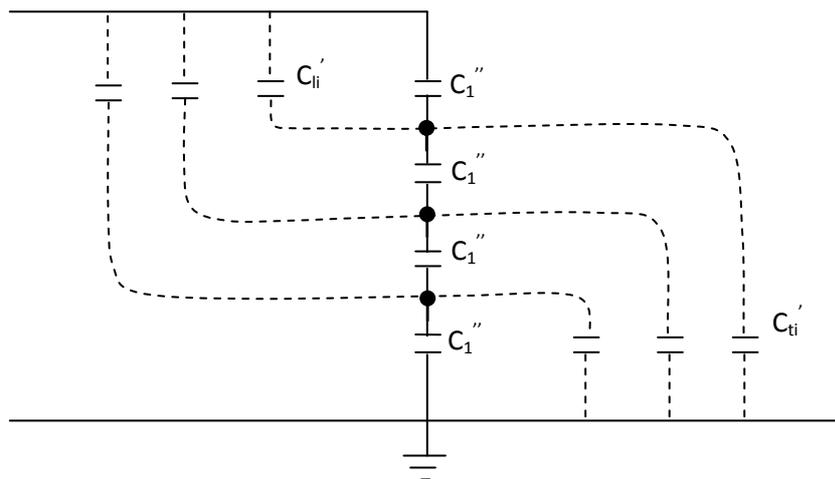


Figure II.25: Diviseur capacitif avec capacités parasites

$C_1''$  : capacités linéique de la branche à haute tension du diviseur capacitif.

$C_{ti}'$  : capacité linéique contre terre de la branche à haute tension.

$C_{li}'$  : capacité linéique contre la ligne d'alimentation de la branche à haute tension.

Les capacités parasites dépendent de la position le long de l'arbre principal.

Les capacités contre terre sont prépondérantes et on ne tient compte que de celles-ci.

$$C_e' \cong 10 \text{ à } 15 \text{ pF/m} \quad \text{et} \quad C_t' \cong 20 \text{ à } 40 \text{ pF/m}$$

De ce fait, le schéma de principe devient :

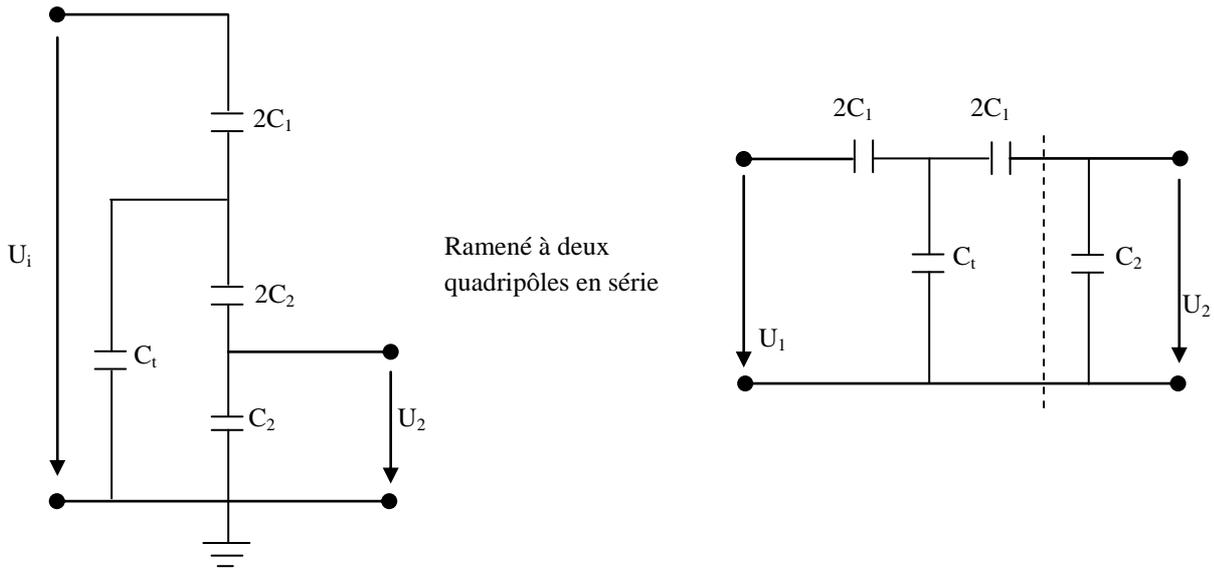


Figure II.26 : Schéma de principe du diviseur capacitif avec capacités parasites

$$\text{Et } g = \frac{U_1}{U_2} \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot \left[ 1 + \frac{C_T}{4C_1} \left( \frac{2C_1 + C_2}{C_1 + C_2} \right) \right] \quad (\text{II.42})$$

De la même manière que pour les diviseurs résistifs, l'effet des capacités parasites est corrigé par l'introduction d'écrans d'équilibrage du potentiel (sphère et anneaux), permettant de rétablir une répartition égale de la tension sur chaque étage du diviseur par un guidage des capacités parasites.

Malgré la bonne sélection des capacités haute tension du diviseur (à faible self inductance et haute stabilité). A haute fréquence des inductances parasites  $L_S$  de l'ordre de quelques  $\mu\text{H}$  interviennent au même temps que les capacités parasites, formant ainsi une ligne de transmission où peuvent se produire des ondes mobiles causant des oscillations. Ces oscillations sont éliminées par l'introduction de résistance  $R$  d'atténuation, avec :

$$R = 3 \sqrt{\frac{L_S}{C_S}} \quad (\text{II.43})$$

Exemple : pour un diviseur de tension de 4MV,  $C = 400\text{pF}$  et  $R = 260\Omega$ .

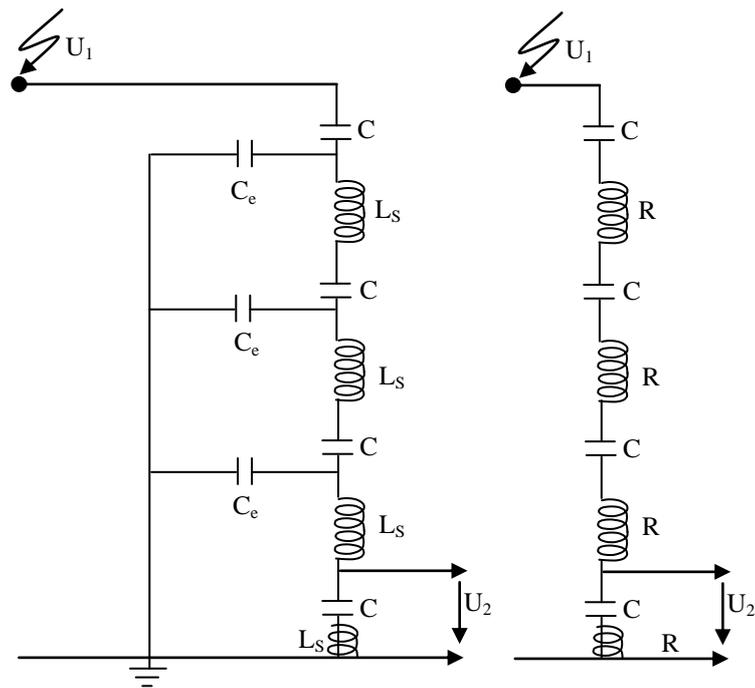


Figure II.26 : Schéma équivalent du diviseur capacitif à haute fréquence



Figure II.27 : Diviseur de tension capacitif -6 MV tension impulsionnelle (Courtesy EDF, Les Renardières, France)

■ Adaptation du diviseur capacitif aux tensions de choc

A l'extrémité du câble coaxial fermée sur une haute impédance, on a un doublement de la tension. Et comme on place une résistance d'entrée  $R = Z$  destinée à adapter le câble coaxial afin d'éviter les réflexions en retour, la tension de sortie  $U_S$  est divisée par un facteur 2. Ce qui donne  $U_2 = U_S$ .

$R = Z$  : résistance d'adaptation

$C$  : capacité du câble coaxial

$\tau$  : temps de parcours du câble coaxial

$g$  dépend du temps.

$$\text{Soit (à } t = 0) \quad g(0) = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{U_S} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \tag{II.43}$$

$$\text{à } t = 2\tau : g(2\tau) = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{U_S} = \frac{C_1 + C_2 + C}{C_1} \tag{II.44}$$

Pour  $R = Z \quad \Rightarrow U_{2i} = U_{1i}$

Et  $C_{\text{câble}} = U_{BT/2}$

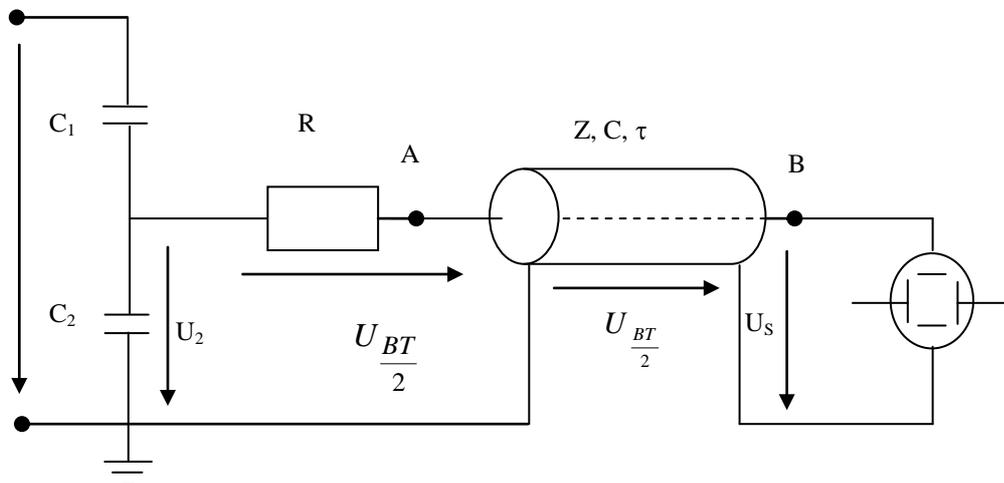


Figure II.28 : Schéma de principe de l'adaptation du diviseur capacitif aux tensions de choc

C- Diviseur mixte

Il est utilisé pour les mesures de tensions de choc de foudre

Pour  $R_1 C_1 = R_2 C_2$

$$U_{H.T} = U_{B.T} \cdot \left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \cong U_{B.T} \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (\text{II.45})$$

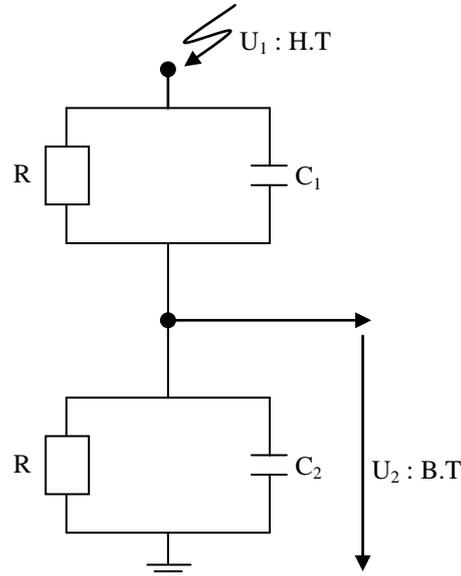


Figure II.29: Schéma de principe du diviseur mixte

### II.7. Transformateur de mesure

On utilise pour la mesure, des transformateurs abaisseurs de tension, de sorte que la mesure soit lue directement sur un voltmètre branché sur la borne basse tension du transformateur.

Un transformateur de tension et un transformateur de mesure pour lequel la tension secondaire est pratiquement proportionnelle à la tension primaire et en phase avec celle-ci. Le transformateur de tension a pour tâche de transformer la haute tension du réseau en une basse tension, alimentant les appareils de mesure et de protection. Les enroulements primaires et secondaires sont séparés par une isolation galvanique à haute tension.

On définit alors le rapport de transformation qui est le rapport de la tension primaire nominale sur la tension secondaire nominale.

$$g = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (\text{II.46})$$

$$\text{Soit : } U_{2n} = U_{1n} \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{Z_v}{Z_v + Z_{CC}} \quad (\text{II.47})$$

Avec :  $Z_v$  : impédance équivalente du circuit de mesure voltmétrique.

$Z_{CC}$  : impédance ramenée au secondaire, telle que :

$$Z_{CC} = R_1'' + R_2 + j\omega(L_1'' + L_2) \quad (II.48)$$

$R_1''$  et  $R_2$  : résistance primaire ramenée au secondaire et résistance secondaire respectivement

$L_1''$  et  $L_2$  : inductance primaire ramenée au secondaire et inductance secondaire respectivement

$N_1$  et  $N_2$  : nombre de spires du bobinage primaire et secondaire respectivement.

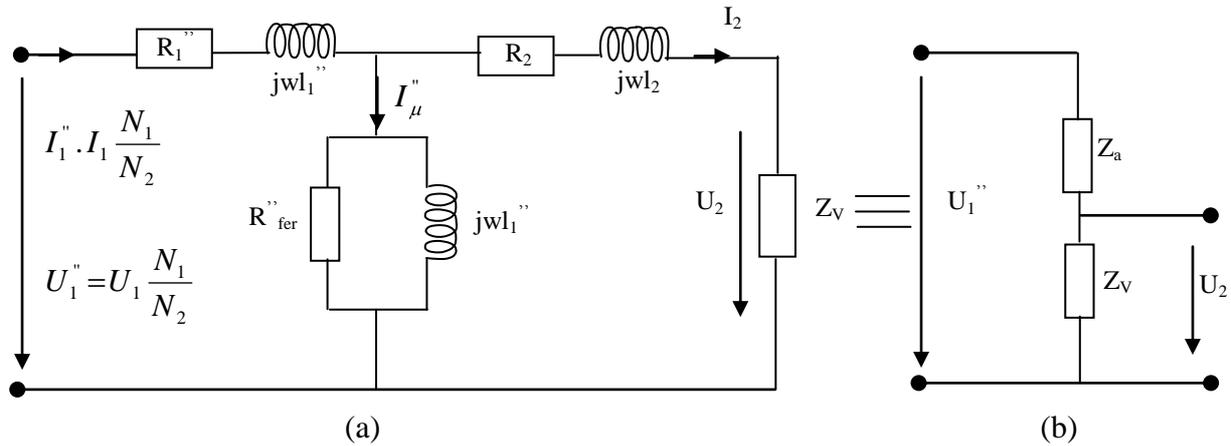


Figure II.30 : Schéma de principe du transformateur de mesure (a) : Schéma équivalent rapporté au secondaire d'un transformateur de tension, (b) : Schéma équivalent

Le circuit de base d'un transformateur de tension à isolation inductive et capacitive est utilisé au laboratoire pour des mesures spéciales. Le secondaire du transformateur reproduit la même forme de la tension primaire.

Selon le type de connexion, il est possible de mesurer des valeurs de crêtes ou efficaces.

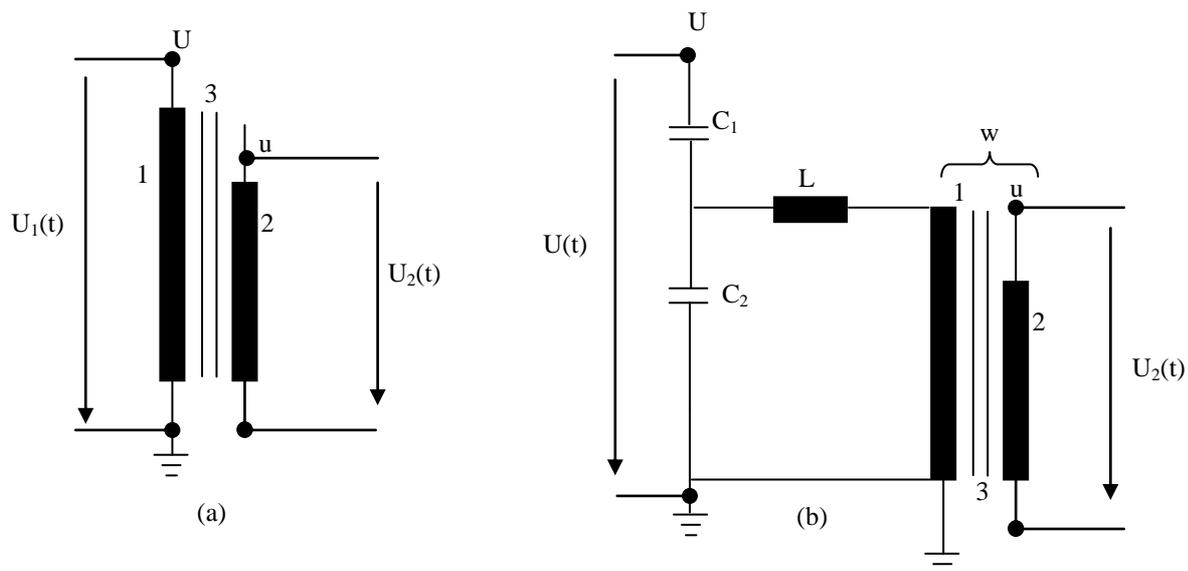


Figure II.31 : Circuit de base d'un transformateur de tension.

(a) à isolation inductive et (b) : à isolation capacitive

(a) : Transformateur de tension inductif.

1 : Bobinage primaire.

2 : Bobinage secondaire.

3 : Noyau de fer.

(b) : Transformateur de tension capacitif.

$C_1$  et  $C_2$  : Diviseur capacitif.

L : Inducteur de résonance.

W : Transformateur similaire à (a)

**II.8. Rappel : Réflexion et réfraction des ondes mobiles dans une ligne sans perte, non homogène :**

La propagation des ondes dans une ligne, sans pertes ( $r = 0, g = 0$ ), dépend de l'impédance d'onde  $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$  ; où  $r$  et  $g$  sont la résistance et la conductance de la ligne ;  $C$  et  $L$  étant la capacité et l'inductance linéique.

Soit une ligne constituée de tronçons n'ayant pas la même impédance.

A chaque discontinuité, une onde mobile éprouve une réflexion et une réfraction partielles.

Pour simplifier l'étude, on considérera dans tous les cas particuliers, que l'onde est rectangulaire.

**II.8.1. Passage d'une onde d'une ligne d'impédance  $Z_1$  à une ligne d'impédance  $Z_2$**

Soit une ligne composée de deux tronçons d'impédances différentes.

Soit A le point de discontinuité.

En ce point, on considérera la solution générale de l'équation d'onde :

$$U = f_1(z - ct) + f_2(z + ct) \tag{II.49}$$

$$f_1(z - ct) : \text{onde réfléchie, notée } r \tag{II.50}$$

$$f_2(z + ct) : \text{onde incidente, notée } i \tag{II.51}$$

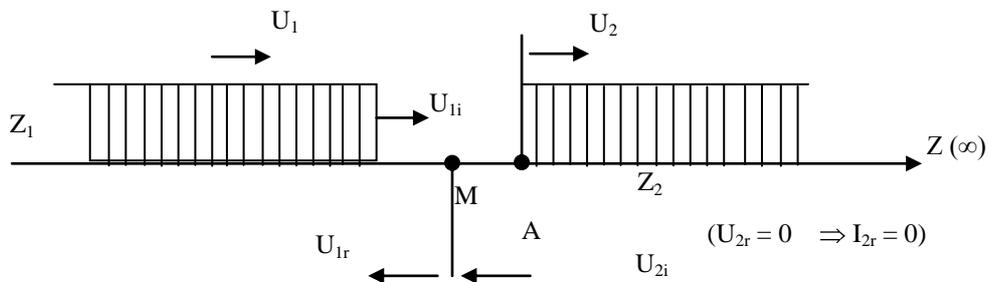


Figure II.32 : Onde mobile sur une ligne d'impédance Z

En un point M de la ligne on a :

$$U = U_i + U_r \quad (II.52)$$

$$I = I_i + I_r \quad (II.53)$$

$$I_i = \frac{U_i}{Z} \quad (II.54)$$

$$I_r = \frac{U_r}{Z} \quad (II.55)$$

Sur la ligne 1 on aura :

$$U_{1i} \text{ et } U_{1r}; \text{ et } i_{1i} \text{ et } i_{1r}$$

Sur la ligne 2 on aura :

$$U_{2i} \text{ et } U_{2r}; \text{ et } i_{2i} \text{ et } i_{2r}$$

Au point de jonction A,  $U_{2r}$  ne peut exister en même temps que  $U_{2i}$ , on peut poser alors :

$$U_1 = U_2 \text{ et } I_1 = I_2$$

$$\text{d'où :} \quad \text{en A : (1) } \begin{cases} U_{2i} = U_{1i} + U_{1r} & \text{et } U_{2r} = 0 \\ i_{2i} = i_{1i} + i_{1r} & \text{et } i_{2r} = 0 \end{cases} \quad (II.56)$$

$$(II.57)$$

$$(II.54) + (II.56) + (II.57) \Rightarrow \frac{U_{1i}}{Z_1} - \frac{U_{1r}}{Z_1} = \frac{U_{2i}}{Z_2} \quad (II.58)$$

$$\Rightarrow (5) \Leftrightarrow \frac{U_{1i}}{Z_1} - \frac{1}{Z_1} (U_{2i} - U_{1i}) = \frac{U_{2i}}{Z_2} \quad (II.59)$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_{1i}}{Z_1} - \frac{U_{2i}}{Z_1} + \frac{U_{1i}}{Z_1} = \frac{U_{2i}}{Z_2} \quad (II.60)$$

$$\Rightarrow \frac{2U_{1i}}{Z_1} = U_{2i} \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) \Leftrightarrow U_{2i} = \frac{2Z_1 \cdot 2Z_2}{Z_1(Z_1 + Z_2)} \cdot U_{1i} \quad (II.61)$$

$$\boxed{\Rightarrow U_{2i} = \frac{2Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \cdot U_{1i}} \quad (II.62)$$

$$(II.58) \text{ et } (II.56) \Rightarrow \frac{U_{1i}}{Z_1} - \frac{U_{1r}}{Z_1} = \frac{1}{Z_2} (U_{1i} + U_{1r}) \Leftrightarrow U_{1i} \left( \frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} \right) = U_{1r} \left( \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)$$

$$\Rightarrow U_{1i} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 \cdot Z_2} \right) = U_{1r} \left( \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 \cdot Z_2} \right) \Rightarrow U_{1r} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) \cdot U_{1i} \quad (II.63)$$

$$\text{Avec : } \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \alpha_{12} \text{ (coefficient de transmission)} \quad (II.64)$$

$$\text{Et : } \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \beta_{21} \text{ (coefficient de réflexion de la ligne 2 sur 1)} \quad (II.65)$$

## Cas particuliers :

- Ligne ouverte à son extrémité :  $Z_2 = \infty \Rightarrow \begin{cases} U_{2i} = 2U_{1i} \\ U_{1r} = U_{1i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_{12} = 2 \\ \beta_{21} = 1 \end{cases}$
- La ligne en court-circuit :  $Z_2 = 0 \Rightarrow \begin{cases} U_{2i} = 0 \\ U_{1r} = -U_{1i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_{12} = 0 \\ \beta_{21} = -1 \end{cases}$
- $Z_1 = Z_2 \Rightarrow \begin{cases} U_{2i} = U_{1i} \\ U_{1r} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_{12} = 1 \\ \beta_{21} = 0 \end{cases}$

## II.9. Essais aux impulsions

## II.9.1. Introduction :

Les essais d'onde de choc servent à observer les effets des surtensions d'origine atmosphérique, dues à la foudre, sur les différents éléments du réseau de distribution et de transport d'énergie électrique.

La forme de ses surtensions dépend des caractéristiques du coup de foudre incident.

Au laboratoire, elles sont représentées par des chocs de tension de forme bi-exponentielle.

Une tension de choc bi-exponentielle de polarité donnée est définie par les trois grandeurs suivantes :

- $U_m$  : La valeur de crête.
- $T_2$  : La durée à mi-amplitude.
- $T_1$  : La durée conventionnelle du front, définie de la façon suivante :  $T_1 = 1,67 (T_{90} - T_{30})$ .

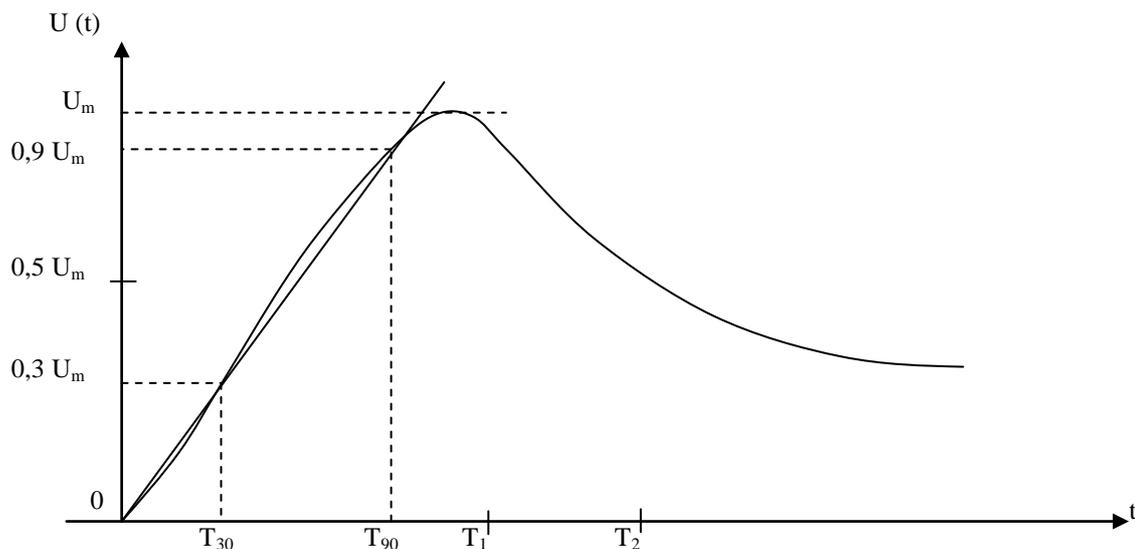


Figure II.33 : Tension de choc bi-exponentielle

Les courants de foudre présentent une grande diversité de forme et d'amplitude, cependant les contraintes diélectriques dues à la foudre sont représentées par un choc de caractéristiques :

$$T_1 = 1,2 \mu s \pm 30\%$$

Et  $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$  (CEI, publication 60)

Cette forme de choc est notée 1,2/50  $\mu s$ .

Ces formes d'onde sont obtenues au laboratoire à l'aide d'un générateur de choc (type Marx par exemple).

### II.9.2. Aspect statistiques :

L'amorçage d'un intervalle d'air n'est pas un phénomène instantané, le temps nécessaire au développement de la décharge disruptive dépend des conditions expérimentales. Comme ce temps, qui varie de façon aléatoire, est comparable à la durée de la tension de choc, le développement de la décharge peut être incomplet. Dans ce cas on parle de "tenue", l'intervalle ayant tenu la contrainte qui lui était appliquée.

Pour certaines valeurs de  $U_m$ , l'amorçage peut avoir ou ne pas avoir lieu.

Ainsi on peut définir une probabilité d'amorçage  $P(U_m)$  égale au rapport du nombre d'amorçage observés sur le nombre total d'essais effectués.

Lorsque l'amplitude de l'onde de tension appliquée  $U_m$  varie,  $P(U_m)$  passe de 0 à 1 de façon continue en suivant généralement la fonction de répartition d'une loi normale :

$$P(U_m) = \int_{-U_m}^{U_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\left(\frac{U-U_{50}}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right) \cdot dU \quad (\text{II.66})$$

La variation de  $P(U_m)$  est caractérisée par deux paramètres :

- $U_{50}$  est la valeur de  $U_m$  qui provoque 50% de tenue et 50% d'amorçage.
- $\sigma$  est l'écart type de la loi normale associée, il caractérise la pente de la droite obtenue sur un papier gaussio-arithmétique.

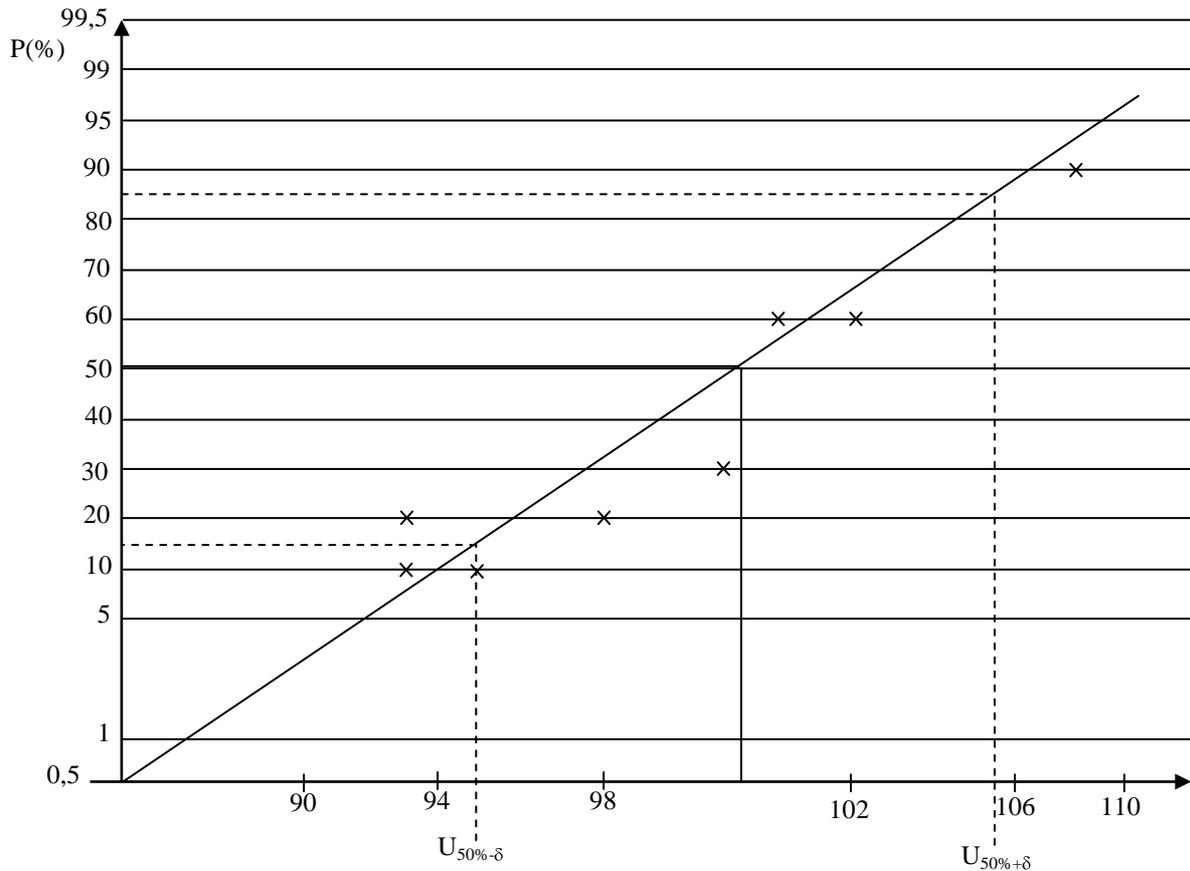


Figure II.34 : Probabilité de disruption en fonction de la tension de crête.

Les points (+) représentent les tensions d'essai  $U_x$ ; X étant la probabilité de décharge disruptive.

### II.9.3. Méthodes de détermination de la tension $U_{50\%}$ de décharge disruptive :

La tension 50% de décharges disruptives définit la rigidité aux impulsions d'un système isolant donné. Cette rigidité est définie parfois aussi par la tension de tenue  $U_0$  telle que :

$$U_0 = U_{50\%} - 2,5 \cdot \sigma \text{ (kV)}. \quad (\text{II.67})$$

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de la probabilité pour qu'une impulsion de valeur de crête et de forme donnée, entraîne une décharge disruptive à travers l'isolation à laquelle elle est appliquée. Généralement, les estimations sont basées sur l'hypothèse que la fonction  $P(U_m)$  qui donne la probabilité de décharge en fonction de la tension de crête de l'impulsion appliquée, peut être représentée par une loi de distribution cumulée normale gaussienne. Ici nous allons présenter deux méthodes.

**II.9.3.1. Méthode des "paliers multiples constants" (CEI60)**

La probabilité de décharge, à un niveau de tension donné,  $P(U_m)$ , est définie par la limite du rapport entre le nombre de chocs ayant entraîné des décharges disruptives et le nombre total de chocs appliqués lorsque ce dernier nombre tendrait vers l'infini :

$$P(U_m) = \lim_{N \rightarrow \infty} (n/N) \quad \text{où : } n \text{ est le nombre de décharges disruptives.}$$

$N \rightarrow \infty$   $N$  est le nombre total de chocs appliqués.

La méthode consiste à appliquer  $N$  fois un niveau de tension constant et de compter le nombre  $n$  de décharges disruptives ayant eu lieu au niveau de l'objet d'essai :

Exemple :  $U_{\text{constant}} = U_x$

$n = 6$

$N = 10$

$$X = \frac{6}{10} = 60\%$$

$$U_x = U_{60\%}$$

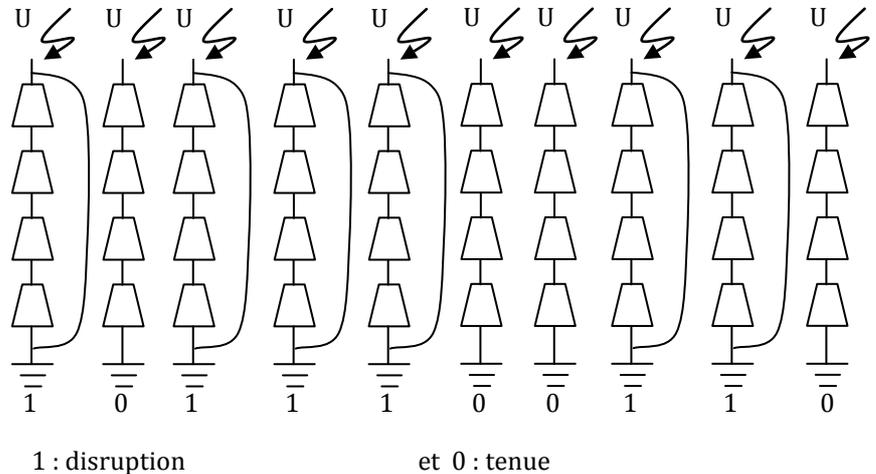


Figure II.35 :Exemple de détermination de la probabilité de décharge disruptive pour un niveau de tension donné  $U$ .

On peut avoir de cette manière tous les niveaux de tension dont la probabilité de décharge est comprise entre 0% et 100%. Ayant déterminé les différents niveaux  $U_x$  ( $X = 0$  à 100%) on les rapporte sur une échelle gaussio-arithmétique. Si la régression est linéaire la loi de distribution est considérée normale. Le niveau 50% de la droite de régression correspondra à la tension  $U_{50\%}$  et la différence entre  $U_{84\%}$  et  $U_{16\%}$  représentera deux fois l'écart type :

$$2\sigma = U_{84\%} - U_{16\%} \text{ (kV)} \tag{II.68}$$

La détermination de  $U_{50\%}$  et  $\sigma$  nécessite la réalisation d'un grand nombre d'essais.



Coefficient de choc : Renseigne sur le temps de retard à l'amorçage.

$$K_{choc} = \frac{U_{50\%}}{U_{d_{statique}}} = \frac{U_{50\%}}{U_{d(50Hz)}} \quad (II.71)$$

- système pte-pte asymetrique



$$U_{d(50Hz)} = 3,16 a + 14 (kV_{eff,cm}) \quad (II.72)$$

- système pte-pte symetrique



$$U_{d(statique)} = 3,16 a + 14 (kV_{eff,cm}) \quad (II.73)$$

a : distance interelectrode (en cm)

## II.10. Mesures de courant en haute tension

**II.10.1. Méthode shunt :** est destinée à des mesures de courant en très basse fréquence (fig. II.36 .a et .b)

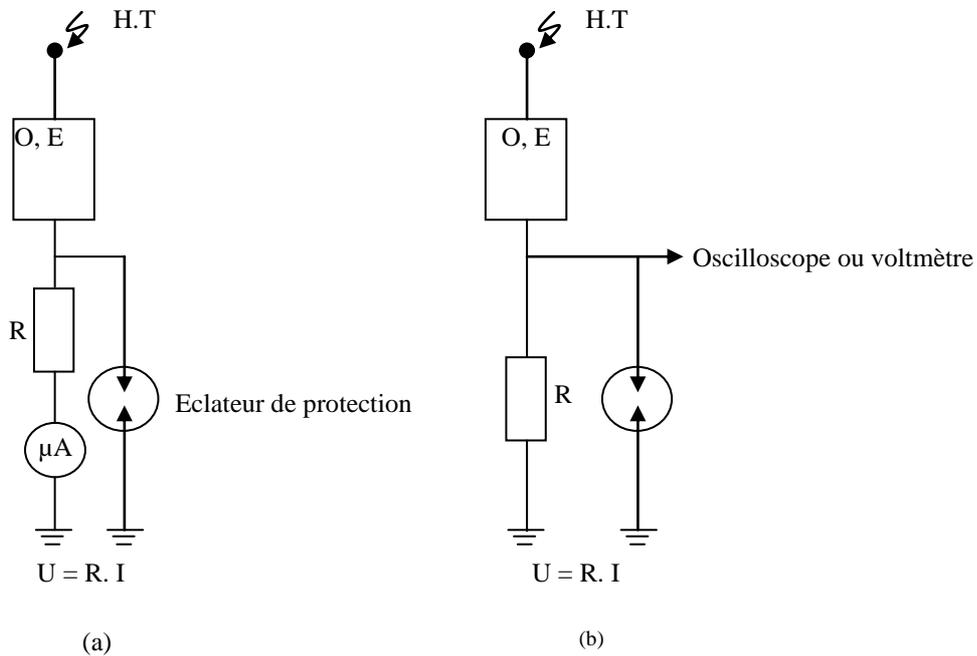


Figure II.36 : Schéma de principe de la méthode shunt de mesures de courant en haute tension

A moyenne et haute fréquence, un flux  $\phi$  variable traverse le circuit de mesure ; à une distance x de l'axe de symétrie du shunt, l'induction B est égale à (fig. II.37) :

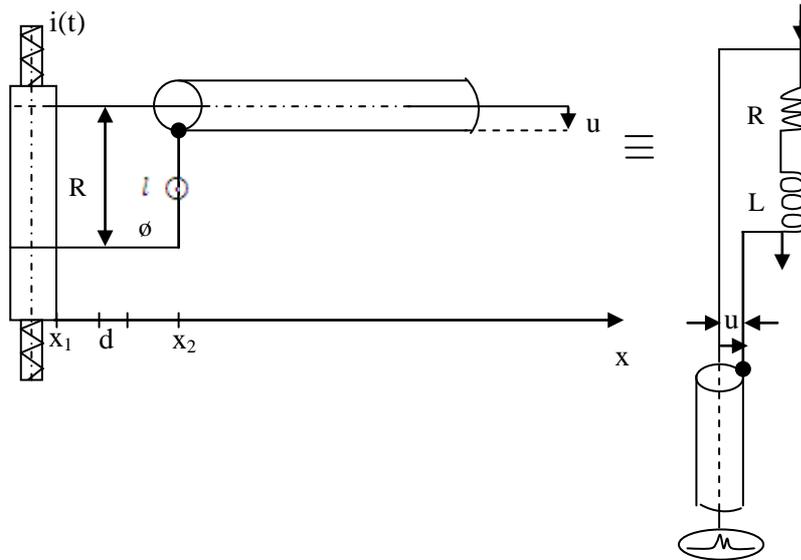


Figure II.37 : Schéma de principe de la méthode shunt de mesures de courant en haute tension à moyenne et haute fréquence

$$B_x = \frac{\mu_0}{2\pi} i(t) \cdot \frac{1}{x} \tag{II.74}$$

Et le flux élémentaire sur une tranche dx est :  $d\Phi_x = B_x \cdot l \cdot dx$  (II.75)

Ainsi le flux total dans la boucle est :  $\Phi = \frac{\mu_0}{2\pi} i(t) \cdot l \cdot \text{Ln} \left( \frac{x_2}{x_1} \right)$  (II.76)

La tension mesurée sur le shunt vaut :

$$U = R \cdot i + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \cdot \text{Ln} \left( \frac{x_2}{x_1} \right) \cdot \frac{di}{dt} = Ri + L \cdot \frac{di}{dt} \tag{II.77}$$

La tension mesurée n'est l'image du courant à mesurer que si  $\frac{di}{dt}$  est faible.

On élimine les effets du flux variables par l'adoption du shunt coaxial (Fig ; II.38). La tension mesurée devient ainsi l'image du courant même à haute fréquence.

Les effets des flux variables s'annulent naturellement.

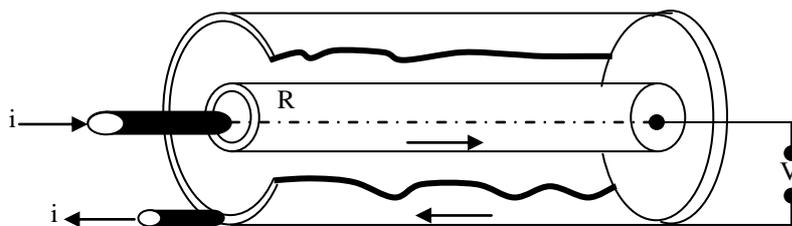


Figure II.38. Shunt coaxial

### II.10.2. Bobine Rogowski ou boucle inductive :

Le courant  $i$  est déterminé sans couplage galvanique.

La tension induite mesurée aux bornes de la résistance  $R$  vaut :

$$u = R im = \frac{\Phi_i - \Phi_{im}}{dt} \quad (\text{II.78})$$

- Si  $R$  est élevée, alors  $im$  est faible et  $\Phi_{im}$  est négligeable devant  $\Phi_i$  ; soit :

$$u = \frac{d\Phi_i}{dt} = M \cdot \frac{di}{dt} = R im \quad (\text{II.79})$$

$M$  : inductance mutuelle entre  $i$  et  $im$ .

$i$  peut être mesuré par l'intermédiaire d'un intégrateur (passif ou actif).

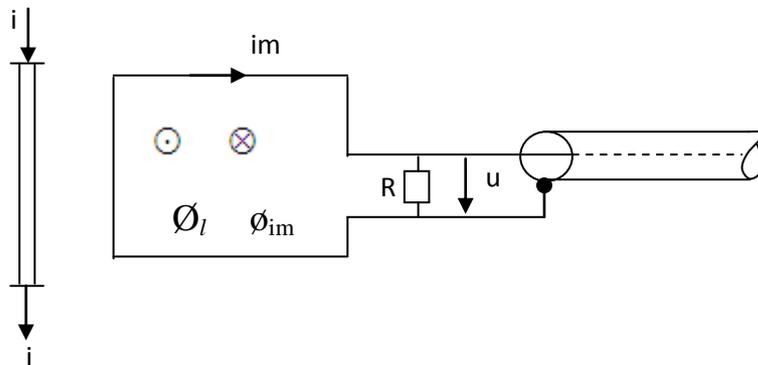


Figure II.39 : Schéma de principe de la boucle inductive

#### Exemple d'intégrateur passif :

$$im = \frac{u}{R} = \frac{M}{R} \cdot \frac{di}{dt} \quad (\text{II.80})$$

$$\text{et} \quad u_i = \frac{1}{C} \int_0^t im \cdot dt = \frac{M}{R \cdot C} \cdot i \quad (\text{II.81})$$

- Si  $R$  est faible, alors  $\Phi_i = \Phi_{im}$

$$\text{Soit : } M \cdot \frac{di}{dt} = L \frac{dim}{dt}$$

$L$  : inductance du circuit principal.

$$im = \frac{M}{L} i \quad (\text{II.82})$$

D'où :

$$U = R im = \frac{R \cdot M}{L} \cdot i \quad (\text{II.83})$$

La tension de mesure dans le cas d'une faible impédance est l'image du courant à mesurer.

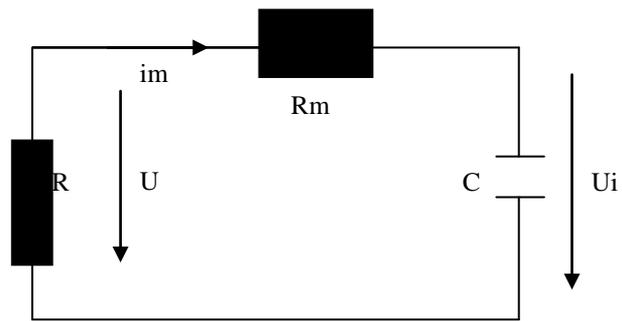


Figure II.40 : Schéma de principe de la boucle inductive à intégrateur passif

## Chapitre

## III

## MESURE DES PERTES DIELECTRIQUES

- III.1 Origine des pertes et angle de pertes
- III.2 Circuit à constantes localisées
  - III.2.1. Circuits simples
    - III.2.1.1. Représentation série
    - III.2.1.2. Représentation parallèle
    - III.2.1.3. Représentation réelle
- III.3. Mesure de  $\text{tg}\delta$  par la méthode du pont de Schering
  - III.3.1. Impédance de branche
  - III.3.2. Mesure de la constante diélectrique  $\epsilon_r$
  - III.3.3. Capacité parasite
  - III.3.4. Mise à la terre des objets
  - III.3.5. Le pont à transformateur différentiel
  - III.3.6. Valeur industriel de  $\text{tg}\delta$
  - III.3.7. Comportement du facteur de pertes diélectriques

## III.1. Origine des pertes et angle de pertes

Les isolants soumis à des champs électriques alternatifs sinusoïdaux sont le siège de pertes d'énergie active sous forme thermique dues à la conductivité du diélectrique, ainsi qu'au phénomène de relaxation. L'élément qui produit ces phénomènes est le facteur de pertes diélectrique  $\text{tg}\delta$ .

- Pour les diélectriques parfaits ( $\gamma=0$ ), le courant est purement capacitif, tel que :

$$I_C = j\omega C_0 u \quad (\text{sans pertes}) \quad (\text{III.1})$$

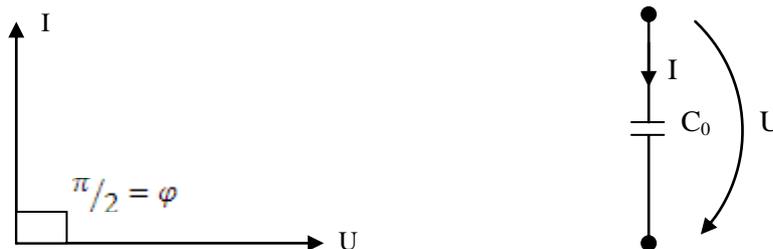


Figure III.1 : Représentation d'un diélectrique parfait

- Pour les diélectriques réels ( $\gamma \neq 0$ )

$\gamma$  n'étant pas nulle, il existe donc un courant de conduction  $I$  défini par :

$$I_C = I_R + jI_{c0} \tag{III.2}$$

$$C_0 = \frac{C}{\epsilon_r} \tag{III.3}$$

Avec ,  $C_0$  : la capacité du diélectrique parfait ( le vide) ;

$C$  : la capacité du diélectrique réel ;

Et  $\epsilon_r$ : la permittivité relative du diélectrique

Le courant réel est :

$$I_C = j\omega C.u \text{ (avec pertes)} \tag{III.4}$$

De (III.4), (III.3) et (III.2), le courant est exprimé par :

$$I_C = j\omega \underbrace{\epsilon_r C_0}_{C} U = I_R + jI_{c0} \tag{III.5}$$

$\delta$ : angle de pertes diélectriques

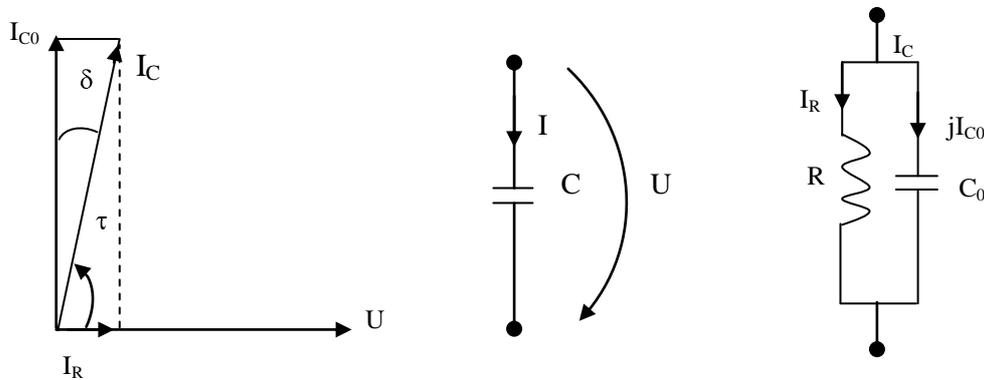


Figure III.2 : Représentation d'un diélectrique réel

On pose :  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ ; (III.6)

avec  $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$  (III.7)

$\epsilon_r''$  : Permittivité relative du diélectrique définissant la composante du courant  $I_R$  en phase avec la tension (composante des pertes actives).

$$\varepsilon_r'' = \frac{I_R}{\omega \cdot C_0 \cdot U} \quad (\text{III.8})$$

$\varepsilon_r'$  : Permittivité relative du diélectrique définissant la composante du courant capacitif  $I_{CO}$   
(composante des pertes réactives)

$$\varepsilon_r' = \frac{I_{CO}}{\omega \cdot C_0 \cdot U} \quad (\text{III.9})$$

Le facteur de pertes diélectrique est la tangente de l'angle de pertes  $\delta$ . On calcule le facteur de pertes en faisant le rapport entre la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance équivalente d'un diélectrique.

De (III.5) et (III.7), on aura :

$$I_C = \underbrace{C_0 \cdot \varepsilon_r'' \cdot \omega \cdot U}_{I_R} + \underbrace{j \cdot C_0 \cdot \varepsilon_r' \cdot \omega \cdot U}_{I_{CO}} \quad (\text{III.10})$$

$$\text{tg} \delta = \frac{I_R}{I_{CO}} = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (\text{III.11})$$

## III.2. Circuit à constantes localisées

En pratique, on représente le plus souvent, un diélectrique par un schéma équivalent, circuit à constantes localisées.

Le circuit équivalent doit être tel que sa réponse en fréquence soit la même que celle du diélectrique.

### III.2.1. Circuits simples

#### III.2.1.1. Représentation série

$$U_R = R_S \cdot I \quad (\text{III.12})$$

$$U_C = \frac{I}{j \cdot C_S \cdot \omega} \quad (\text{III.13})$$

D'où :

$$\text{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{R_S I}{I / c \cdot \omega} = R_S \cdot C_S \cdot \omega \quad (\text{III.14})$$

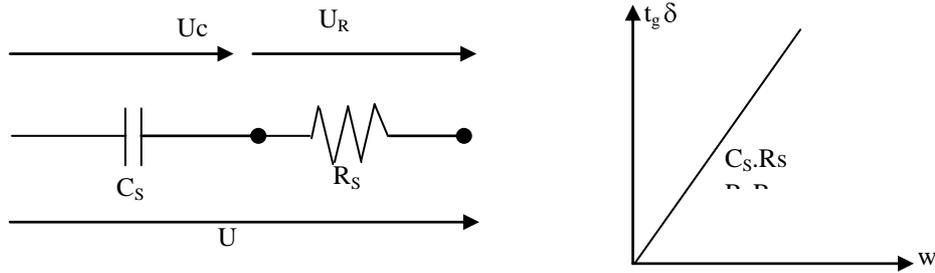


Figure III.3 : Représentation du circuit à constantes localisées série

Ou encore :

$$Z_s = R_S + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_S} \tag{III.15}$$

$$I = C_0 \cdot \omega \cdot u (\epsilon_r'' + j \epsilon_r') \tag{III.16}$$

$$y = \frac{I}{Z_s} = \frac{I}{U} = \frac{R_S C_S^2 \omega^2}{R_S^2 C_S^2 \omega^2 + 1} + j \frac{C_S \cdot \omega}{R_S^2 C_S^2 \omega^2 + 1} = \frac{I}{U} = C_0 \cdot \omega (\epsilon_r'' + \epsilon_r'). \tag{III.17}$$

D'où :

$$\epsilon_r'' = \frac{1}{C_0} \cdot \frac{R_S \cdot C_S^2 \cdot \omega}{R_S^2 C_S^2 \omega^2 + 1} \tag{III.18}$$

$$\epsilon_r' = \frac{1}{C_0} \cdot \frac{C_S}{R_S^2 \cdot C_S^2 \cdot \omega + 1} \tag{III.19}$$

$$\Rightarrow \text{tg } \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = R_S \cdot C_S \cdot \omega \tag{III.20}$$

$$\underline{w \rightarrow 0} \quad \begin{aligned} \epsilon_r'' &\rightarrow 0 \\ \epsilon_r' &= \frac{C_S}{C_0} \end{aligned}$$

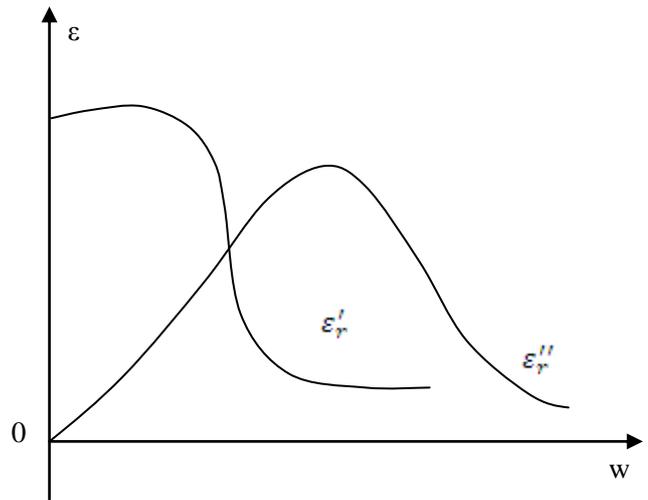


Figure III.4 : Réponse en fréquence de  $\epsilon_r$  du circuit série

$$\epsilon_r \text{ statique} = \frac{C_S}{C_0} = \epsilon_r'' + \epsilon_r' \tag{III.21}$$

qd  $w \rightarrow 0$

$$\underline{w \rightarrow \infty} : \quad \begin{aligned} \epsilon_r'' &\rightarrow 0 \\ \epsilon_r' &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

$$\epsilon_r \text{ Optique} \equiv 0 = \epsilon_r'' + \epsilon_r' \tag{III.22}$$

qd  $w \rightarrow \infty$

- Les pertes diélectriques sont représentées par les pertes joules dans  $R_s$ .

$$P_D = \frac{U_R^2}{R_S} = R_S \cdot I^2 = \frac{U^2 \cdot R_S}{R_S^2 + \frac{1}{C_S^2 \cdot w^2}} = U^2 \cdot C_S \cdot w \cdot \frac{\text{tg } \delta}{1 + \text{tg}^2 \delta} \quad (\text{III.23})$$

$$U_R = \frac{R_S}{R_S + \frac{1}{C_S \cdot w}} \cdot U. \quad (\text{III.24})$$

### III.2.1.2. Représentation parallèle

$$\text{tg } \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{u/R_P}{C_P \cdot w \cdot u} = \frac{1}{R_P \cdot c_p \cdot w} \quad (\text{III.25})$$

Ou encore :

$$y = \frac{I}{U} = \frac{1}{R_P} + j \cdot w \cdot c_p = \frac{I}{U} = C_O \cdot w (\epsilon_r'' + j \epsilon_r') \quad (\text{III.26})$$

$$I = C_O \cdot w \cdot u (\epsilon_r'' + j \epsilon_r'). \quad (\text{III.27})$$

$$\Rightarrow \epsilon_r'' = \frac{1}{R_P \cdot C_O \cdot w} \quad (\text{III.28})$$

Et  $\epsilon_r' = \frac{c_p}{c_0} \quad (\text{III.29})$

D'où :  $\text{tg } \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{1}{w \cdot R_P \cdot c_p}. \quad (\text{III.30})$

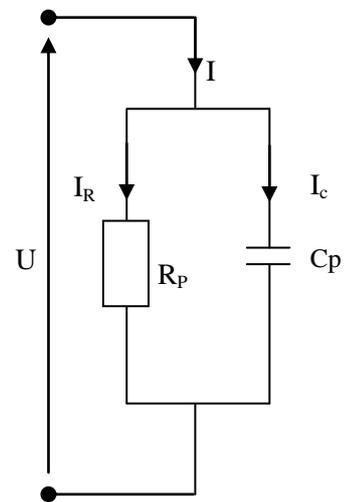


Figure III.5 : Représentation du circuit à constantes localisées parallèle

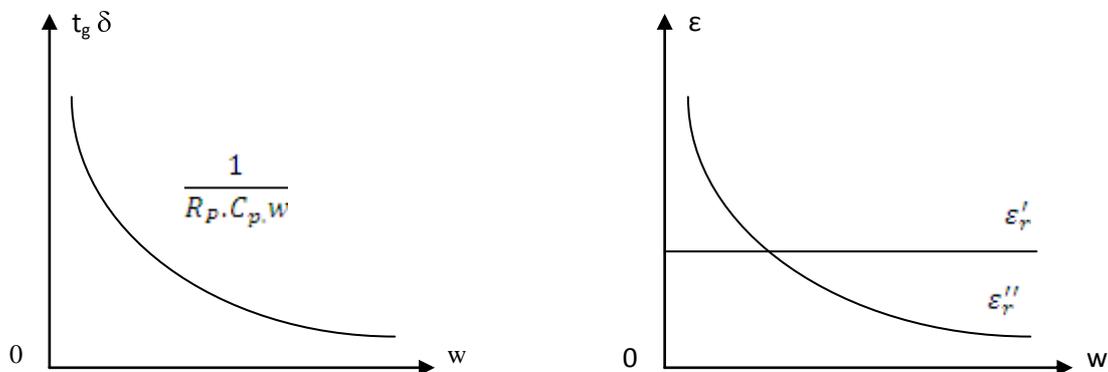


Figure III.6 : Réponse en fréquence de  $\text{tg } \delta$  et  $\epsilon_r$  du circuit parallèle

- Les pertes diélectriques sont :

$$P_D = \frac{u^2}{R_P} = w.c_p.u^2.tg\delta = w.\epsilon_0.\epsilon_r.tg\delta.E^2.\frac{s.a}{v} = \epsilon_r.\frac{E^2}{R_P.c_0} \quad (III.31)$$

(par unité de volume)

Avec :  $c_p = \epsilon_0.\epsilon_r.\frac{s}{a}$  (III.32)

$u =$  (III.33)

$c_p = \epsilon_0.c_0$  (III.34)

### III.2.1.3. Représentation réelle

C'est la Combinaison des représentations série et parallèle.

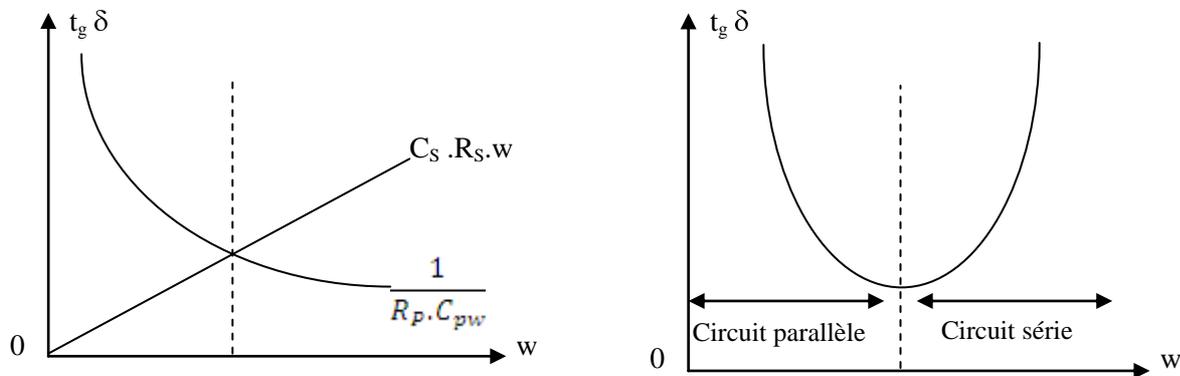


Figure III.7 : Réponse en fréquence de  $tg\delta$  et  $\epsilon_r$  du circuit réel

### III.3. Mesure de $tg\delta$ par la méthode du pont de Schering

Le pont de SCHERING permet la mesure de la capacité et du facteur de perte d'isolation (condensateur, câbles, isolateurs, bornes de traversées, isolants, etc....) en haute tension alternative.

#### III.3.1. Impédance de branche

Soit le pont de Schering de la figure (III.8).

L'impédance de l'objet d'essais

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega c_x} \quad (III.35)$$

$$Z_x = \frac{1}{j\omega.c_x} \left( + jtg\delta_x \right) \quad (III.36)$$

Avec :  $tg \delta_x = w.R_x.C_x$  (III.37)

$$Z_N = \frac{1}{j\omega C_N} \tag{III.38}$$

$Z_N$  : Impédance de la capacité étalon de facteur de perte faible.

$$Z_3 = R_3 \tag{III.39}$$

Et

$$Z_4 = \frac{R_4 \cdot \left( \frac{1}{j\omega C_4} \right)}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}} \tag{III.40}$$

A l'équilibre :  $I_G = 0$

$$D'où : Z_x \cdot Z_4 = Z_N \cdot Z_3 \tag{III.41}$$

En remplaçant les expressions des impédances et en égalant les parties réelles et imaginaires, on trouve :

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \tag{III.42}$$

$$tg \delta_x = w.R_x.C_x = \frac{wR_3.C_x.C_4}{C_N} \tag{III.43}$$

$$\Rightarrow tg \delta = w.R_4.C_4 \tag{III.44}$$

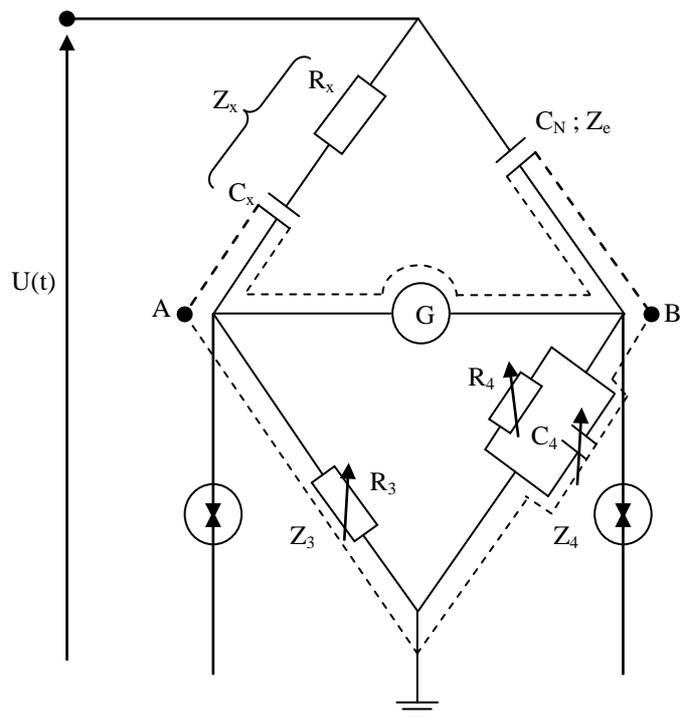


Figure III.8 : Le pont de Schering

### III.3.2. Mesure de la constante diélectrique $\epsilon_r$

$$C_X = \epsilon_r \cdot C_O \Rightarrow \epsilon_r \frac{C_x}{C_O}; \text{ avec } C_O = \epsilon_o \cdot \frac{S}{a} \quad (\text{III.45})$$

D'où :

$$\epsilon_r = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N \cdot \frac{a}{\epsilon_o \cdot S} \quad (\text{III.46})$$

### III.3.3. Capacité parasite

Les résultats de mesures sont affectés par l'existence des capacités parasites  $C_{p3}$  et  $C_{p4}$  (figure III.9); elles ont pour origines les longs câbles coaxiaux de connexion des capacités de la bonne haute tension aux bornes du pont d'équilibrage et également à l'écran de la branche basse tension du pont.

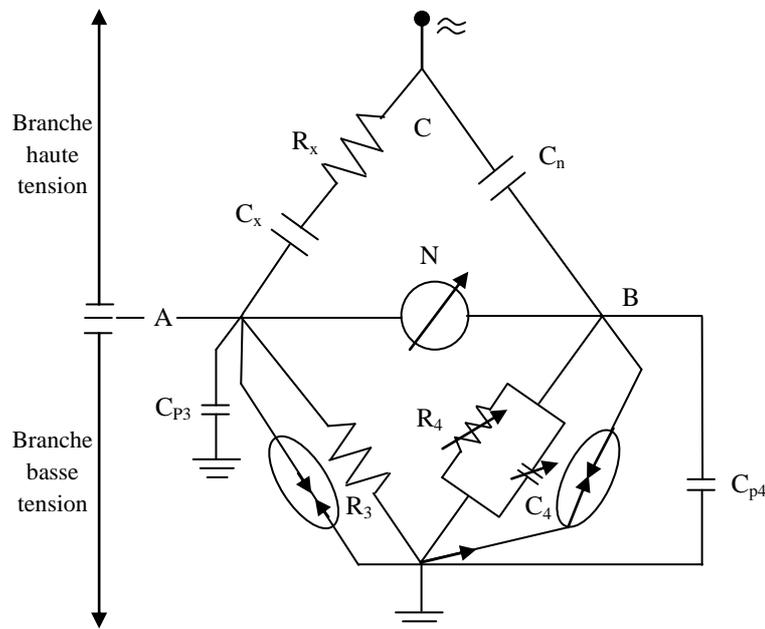


Figure III.9 : Pont de Schering avec capacités parasites

- **Pour éliminer les capacités parasite**, il faut porter la gaine du câble coaxial et l'écran au même potentiel que les bornes A et B du pont.

Ceci est réalisé au moyen d'un amplificateur opérationnel à facteur d'amplification égal à 1 de sorte qu'aucune capacité n'existe entre les bornes A et B et l'écran (figure III.10).

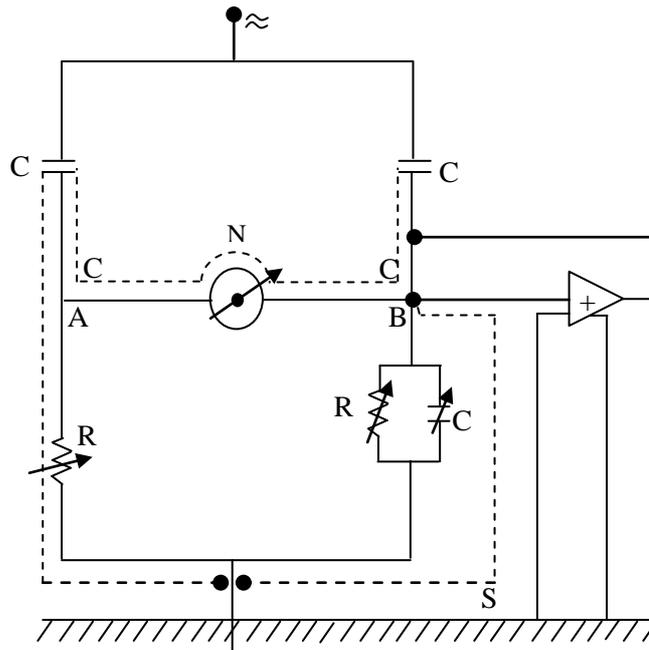


Figure III.10 : Elimination des capacités parasites au moyen d'un amplificateur opérationnel

- Une autre méthode d'élimination de ces capacités parasites consiste à porter les bornes A et B au potentiel de la terre en appliquant un potentiel opposé à la borne D.

Ceci est réalisé par un réseau actif qui contrôle à la fois l'intensité et l'angle de phase du potentiel en D. En connectant un côté de l'indicateur zéro alternativement à la borne A et à la terre, le potentiel en A et B est graduellement ajusté au potentiel de la terre (figure 11). Cette méthode est appelée 'Wagners earth'

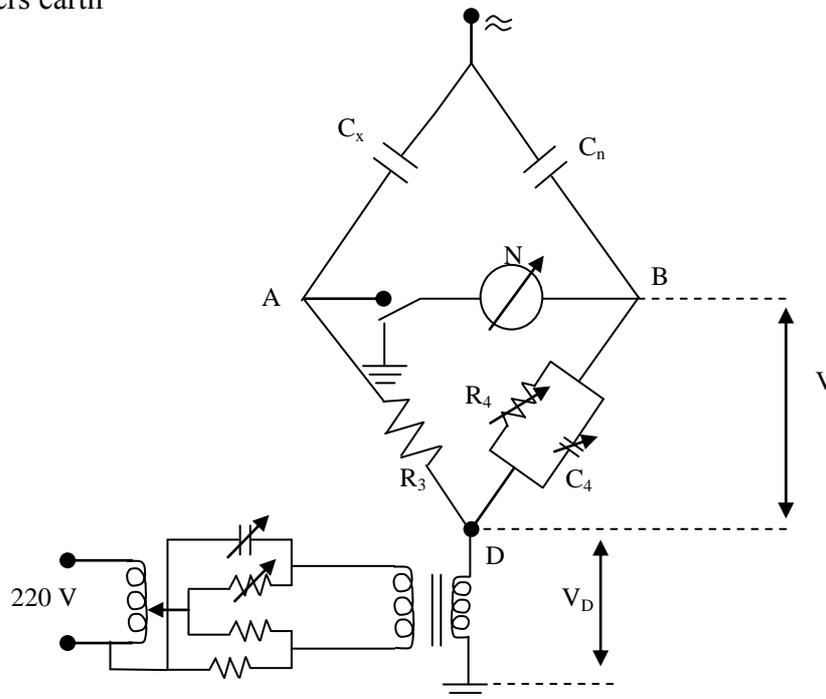


Figure III.11 : Elimination des capacités parasites par mise à la terre des bornes A et B

\* Le potentiel des bornes A et B est porté à la terre en imposant une tension opposée à la Bonne D telle que  $V_D = -V_B$

- **Méthode du double équilibrage**

Elle permet la détermination de la vraie valeur de  $tg\delta$  dans le cas où la mesure est affectée par l'existence des capacités parasites.

$$tg\delta_{reel} = wR_4C_4 + wR_4Cp_4 - wR_3Cp_3 \quad (III.47)$$

Ou

$$tg\delta = tg\delta_{mesurée} + wR_4Cp_4 - wR_3Cp_3 \quad (III.48)$$

Pour contrôler ces résultats, le pont est équilibré une 2<sup>ème</sup> fois en choisissant une autre valeur de  $R_3$  soit  $R_3/2$ .

$$\text{Alors } tg\delta_{reel} = tg\delta_{mesurée} + w \cdot \frac{1}{2} R_4 Cp_4 - w \frac{1}{2} \cdot R_3 Cp_3 \quad (III.49)$$

Où :  $tg\delta_{mesurée}$  est la nouvelle valeur de  $tg\delta$ .

Si la seconde teste donne la même valeur que la 1<sup>ère</sup> mesure, les parasites sont inactifs et la valeur mesurée de  $tg\delta$  est juste. Cependant, si le second teste donne un résultat dévié, un facteur de correction peut être introduit ;

Des équations (III.48) et (III.49) on obtient ;

$$o = \Delta tg\delta + \frac{1}{2} wR_4Cp_4 - \frac{1}{2} wR_3Cp_3. \quad (III.50)$$

$\Delta tg\delta$  est la différence des valeurs mesurées ;

De (III.50) dans (III.49) on obtient :

$$tg\delta_{reel} = tq\delta_{mesuré} - 2\Delta tg\delta \quad (III.51)$$

L'effet des capacités parasites est dans ce cas éliminé.

### III.3.4. Mise à la terre des objets

L'électrode basse tension de l'objet d'essai ne peut être déconnectée de la terre dans certains cas, ceci est généralement le cas des composants en service tels que les câbles souterrains ou les transformateurs assemblés.

Dans ce cas une modification du pont de Schering est apportée où un coté de l'objet d'essai  $C_x$  est mis à la terre.

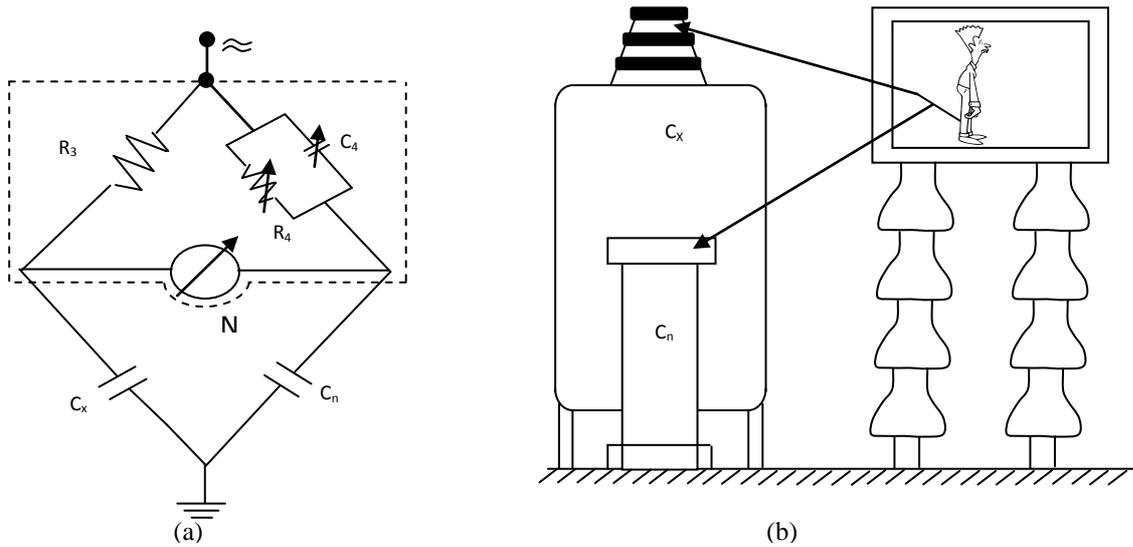


Figure III.12 : Pont de Schering inversé (a) avec usage d'une cage de Faraday (b)

Le pont de SCHERING inversé est dans ce cas là utilisé (figure III.12.a). Les composants variables  $R_3$ ,  $R_4$  et  $C_4$  du pont sont placés dans une cage de Faraday à haut potentiel. Le pont est actionné par télécommande ou bien l'opérateur actionne le pont de l'intérieur de la cage de Faraday (figure III.12.b).

Les méthodes de 'Wagners earth' et du double équilibrage du pont peuvent dans ce cas être utilisées.

Le pont de Schering inverse est également utilisé dans les installations mobiles conçues pour tester les équipements haute tension sur site.

Une autre possibilité est de déconnecter le transformateur H.T. de la terre et à la place porter à la terre une borne du pont (figure III.13).

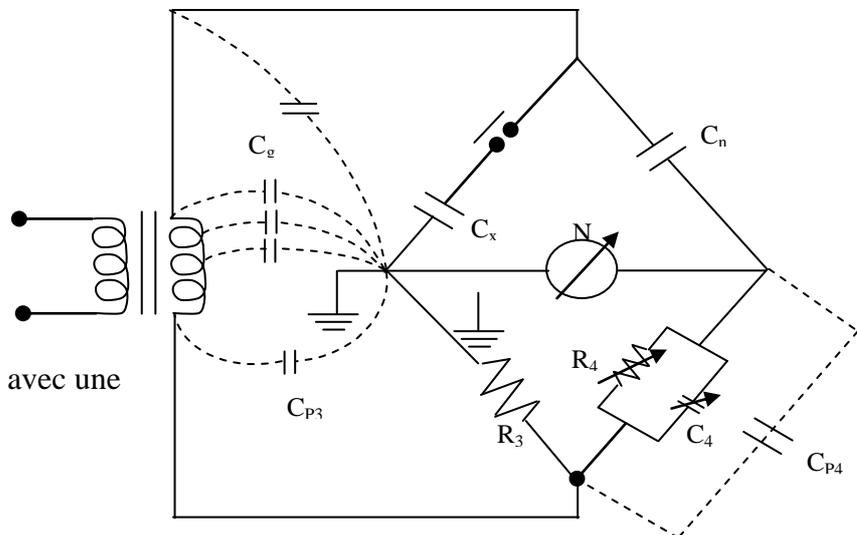


Figure III.13 : Pont de Schering avec une borne mise à la terre

Ce montage introduit la capacité  $C_g$  entre le bobinage du transformateur et la terre.

L'effet de cette capacité est éliminé par une mesure double :

- La première mesure est effectuée alors que  $C_x$  est déconnectée et  $\text{tg } \delta_g$  et  $C_g$  sont mesurées.
- La 2<sup>ème</sup> mesure est effectuée alors que  $C_x$  est connectée à la H.T et  $C_x + C_g$  est mesurée.

Le facteur de perte diélectrique correspondant est alors égal à :

$$\frac{C_x \cdot \text{tg } \delta_x + C_g \cdot \text{tg } \delta_g}{C_x + C_g} \quad (\text{III.52})$$

Ce qui permet de calculer  $\text{tg } \delta_x$ .

La capacité parasite  $C_{p3}$  intervient également, cependant on ne peut pas dans ce cas la compenser par la méthode de 'Wagners earth' ou d'écran.

La méthode du double équilibrage du pont peut alors être utilisée combinée aux deux tests de positions, ceci conduit à un quadruple équilibrage.

### III.3.5. Le pont à transformateur différentiel

Les capacités  $C_x$  et  $C_n$  sont placées dans la branche H.T. La branche basse tension est remplacée par les bobinages  $w_1$  et  $w_2$  du transformateur, le troisième bobinage du transformateur est connecté à l'indicateur zéro.

Le pont est en équilibre si :

$$C_x = \frac{w_1}{w_2} \cdot C_n \quad (\text{III.53})$$

Le nombre de spire du  $w_1$  est fixé à 4 positions, de sorte que le rapport à choisir soit de 0,1 ; 1 ; 10 ou 100.

Le bobinage  $w_2$  donne des positions de réglage variables (figures III.14 et III.15).

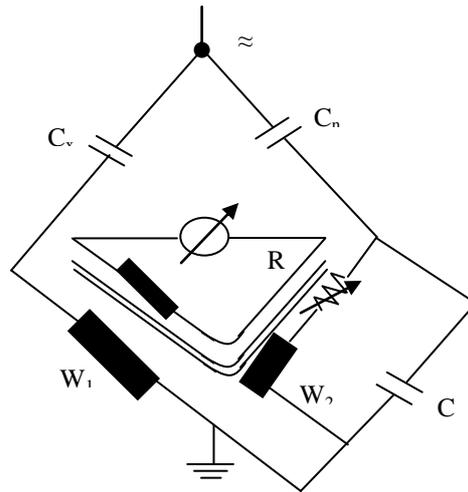


Figure III.14 : Pont de Schering à transformateur différentiel

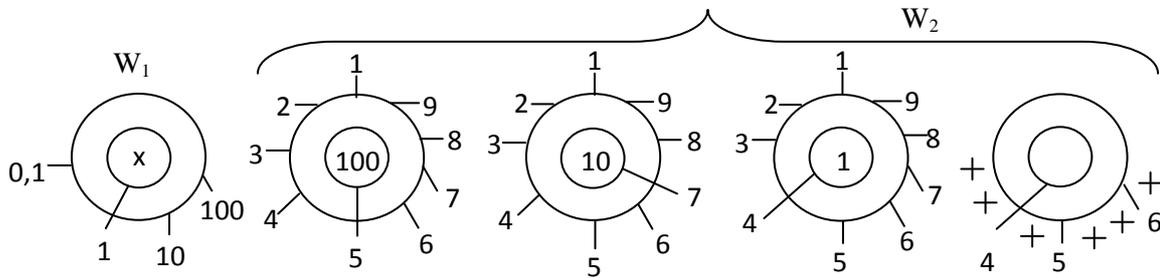


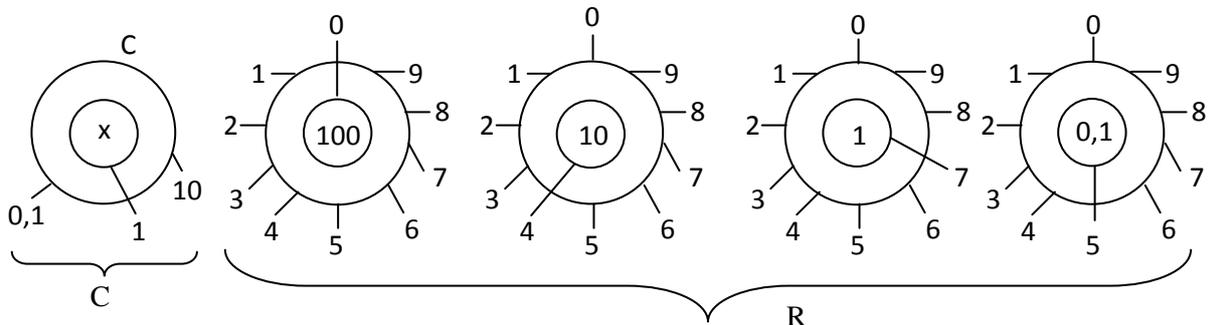
Figure III.15 : Positions de réglage

$C_n = 574,45 \text{ pF}$

Pour déterminer  $tg \delta$ , des résistances et des capacités variables sont ajoutées au pont. Le facteur de perte est donné par :

$$tg \delta = w.C.R \tag{III.54}$$

Le réglage de  $C$  et  $R$  donne la valeur de  $tg \delta$  à 50 ou 60 Hz. 3 positions donnent  $W.C = 0,1$  ou  $1$  ou  $10$  ;  $R$  permet l'ajustage fin ;



$$tg \delta = 47,5 \cdot 10^{-4}$$

Figure III.16 : Positions de réglage

Le pont à transformateur différentiel peut être utilisé dans le cas des objets d'essai où un côté est en permanence porté à la terre. Le pont peut alors être placé dans une cage de Faraday à la méthode du pont à transformateur inversé (figures III.12 et III.13).

### III.3.6. Valeur industriel de $tg\delta$

- $tg\delta = (1 \text{ à } 10) \cdot 10^{-4}$  dans les câbles HT, tel que le PE (faible perte)
- $tg\delta = (20 \text{ à } 50) \cdot 10^{-4}$ , papier imprégné (limite de tension 400 à 700 kV)
- Le vieillissement augmente  $tg\delta$  ce qui peut alors conduire à un claquage thermique.
- $tg\delta \geq 100 \cdot 10^{-4}$  (forte perte), PVC utilisé à 6 kV au plus, au delà, un claquage thermique peut s'opérer dans l'isolant et  $tg\delta$  devient inacceptable.

### III.3.7. Comportement du facteur de pertes diélectriques

La répartition de l'évolution du facteur de pertes  $tg\delta$  d'une isolation en fonction de la tension (figure III.17), de la température (figure III.18) et du temps, permet de suivre la dégradation de cette isolation et prévoir la durée de vie moyenne.

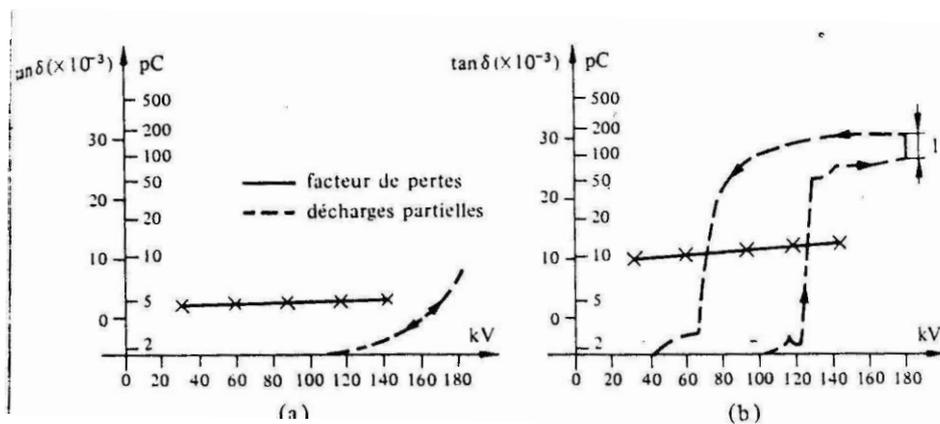
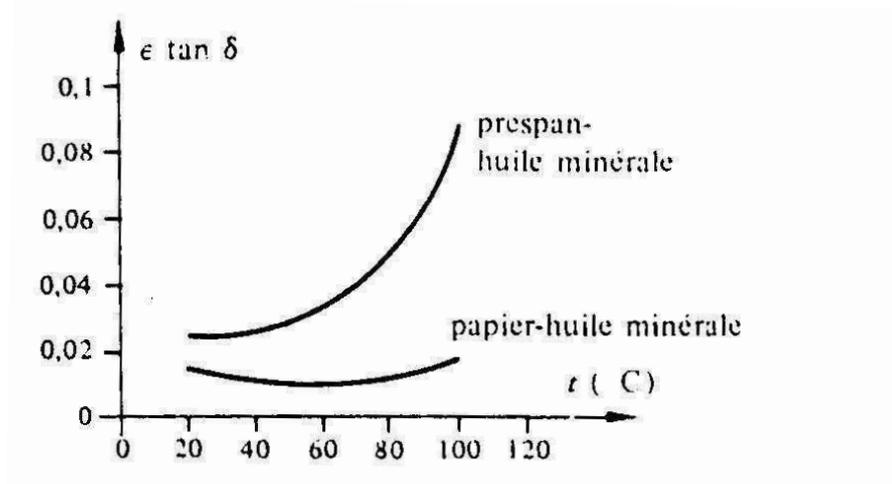
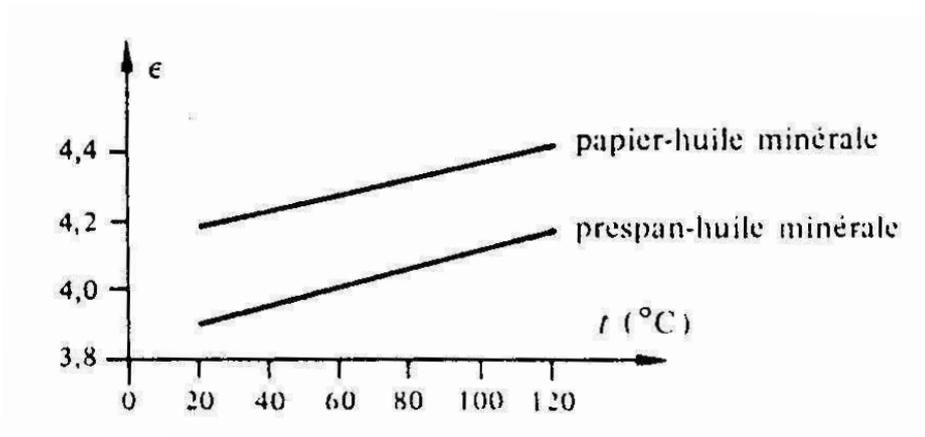


Figure III.17 : Evolution du facteur de pertes diélectriques et du taux de décharge partielle en fonction de la tension pour une isolation papier-huilé minérale : (a) bonne isolation; (b) mauvaise isolation



(a)



(b)

Figure III.18 : Variation de  $\epsilon \tan \delta$  (a) et  $\epsilon$  (b) en fonction de la température pour différents isolants

## Chapitre

## IV

**MESURE DES DECHARGES PARTIELLES**

## IV.1. Définition

## IV.2. Propriété des D.P

## IV.3. Schéma électrique équivalent d'une cavité dans un diélectrique solide

## IV.4. Méthodes de mesure des D.P

## IV.4.1. la détection électrique directe

## IV.4.2. la détection électrique indirecte

- La méthode "en pont de SCHERING"
- Détection équilibrée
- Traitement électronique

## IV.5. Hauteur d'impulsion

- Amplitude de la décharge
- Dimension physique
- Energie de dissipation

## IV.6. Localisation des D.P dans les échantillons complexes

- La méthode de détection équilibrée
- Localisation par ondes mobiles
- Détection de la D.P par technique de déviation
- Localisation des D.P. par détermination du champ électromagnétique

## IV.7. Ellipses de représentations des décharges partielles

**IV.1. Définition**

Une décharge partielle est définie comme une décharge électrique qui ne court-circuite que partiellement l'isolant entre deux conducteurs. Ces décharges peuvent se produire ou non dans la zone limitrophe d'un conducteur. On distingue deux types principaux de DP :

- **Les décharges superficielles :**

Pour un matériau dont la conductivité superficielle est faible, il peut se déposer des homocharges positives ou négatives qui restent piégées.

Quand la tension s'annule, la contrainte électrique dans l'air entre les charges déposées sur la surface de l'électrode augmente et provoque une décharge de sens contraire.

- **Les décharges transversales :**

Dans ce cas, la décharge est essentiellement imputable à un champ perpendiculaire à la surface libre de l'isolant solide. Elle peut se situer soit dans une zone en contact avec un conducteur, soit au sein de l'isolant.

Dans le cas particulière où la décharge prend naissance dans les poches ou occlusions gazeuses sans communication avec l'extérieure, la pression gazeuse existant à l'intérieure de la vacuole peut évoluer en fonction du temps, et corrélativement, le régime de décharge lui-même. Les décharges correspondantes sont alors dite décharges internes.

#### IV.2. Propriété des D.P

Les propriétés des D.P peuvent être résumées comme suit :

- Le nombre de D.P à un temps donné dépend linéairement de la durée du temps d'application de la tension, ainsi que des niveaux de tension appliquée.
- Une décharge partielle a deux tensions seuils : Tension d'apparition et tension d'extinction. La tension seuil des DP est faible sous une haute température et les longs cycles thermiques.
- L'action des DP peut conduire soit à la formation de produits inhibiteurs de décharge (auto-extinction des décharges), soit à la défaillance totale ou partielle de l'isolation par échauffement excessif au par formation de défaut (craquelure, arborescence) dépassant une taille critique.

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et de vacuoles gazeuses. Lorsque ces isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle on constate que le champ électrique est plus élevé dans les vacuoles gazeuses  $E_g$  que dans l'isolant  $E_i$  (Figure IV.1).

Etant donné la continuité du vecteur induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial, on trouve :

$$\frac{E_g}{E_i} = \frac{\epsilon_{ri}}{\epsilon_{rg}} \quad (\text{IV.1})$$

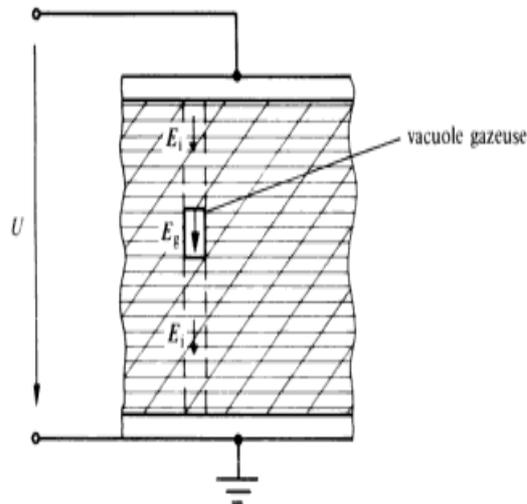


Figure IV.1 : Isolant comportant une inclusion gazeuse

Deux facteurs contribuent à faire apparaître des décharges partielles dans les isolants :

- D'une part, la permittivité relative des isolants solides étant toujours plus élevée (2 à 6 fois) que celle des gaz ( $\epsilon_{rg} = 1$ ), le champ électrique dans les vacuoles est proportionnellement plus élevé.
- d'autre part, la rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse (environ 10 fois) que celle des solides.

Ces deux constatations, allant dans le même sens, font que des décharges dites partielles apparaissent dans les vacuoles des isolants solides pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celles qui entraîneraient la perforation du diélectrique solide.

### IV.3. Schéma électrique équivalent d'une cavité dans un diélectrique solide

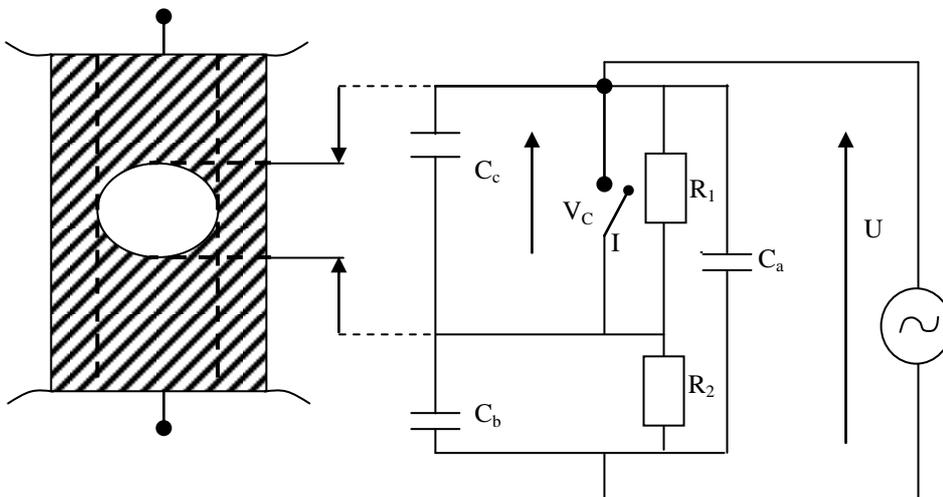


Figure IV.2 : Schéma électrique équivalent d'une cavité dans un diélectrique solide

- Où :
- $C_c$  : capacité de la vacuole siège de décharges
  - $C_b$  : capacité de l'isolation saine au droit de la cavité.
  - $C_a$  : capacité parallèle du reste de l'isolant.
  - $R_1$  : Résistance superficielle des parois de la vacuole
  - $R_2$  : Résistance volumique de l'isolant de capacité  $C_b$ .

Lorsqu'une tension  $U$  suffisante est atteinte aux bornes du diélectrique, une décharge disruptive apparaît dans la cavité gazeuse ( $E_C = E_{d \text{ gaz}}$ ).

Par suite de la neutralisation des charges sur les parois de la cavité, la tension aux bornes de  $C_c$  diminue de  $\Delta U_C$  jusqu'à extinction de la décharge, appelée alors décharge partielle.

La variation  $\Delta U_C$  aux borne de la capacité  $C_c$  entraîne une chute de tension  $\Delta U$  aux borne de la capacité  $C_a$ . Le transfert des charges  $\Delta Q$  de la capacité  $C_a$  vers les capacités série  $C_c$  et  $C_b$ , rétablissant l'équilibre des charges après la neutralisation de certaines d'entres-elles sur les parois de la cavité, permet d'écrire la relation suivante :

$$\Delta Q = C_a \cdot \Delta U = \frac{C_c \cdot C_b}{C_c + C_b} \cdot \Delta U_C \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{Comme } C_b \ll C_c \quad \text{on a : } \Delta U = \frac{C_b}{C_a} \cdot \Delta U_C \quad (\text{IV.3})$$

Au moment de la décharge (court-circuit de la cavité) on a :

$$\Delta U_C = U_C. \quad (\text{IV.4})$$

$$\text{D'où : } \Delta U = \frac{C_b}{C_a} \cdot U_C \quad \Rightarrow \Delta Q = C_a \cdot \Delta U = C_b \cdot U_C \quad (\text{IV.5})$$

Juste avant l'application d'une décharge partielle, en champ uniforme on a :

$$U_C = E_C$$

Où,  $E_C$  : rigidité diélectrique de la cavité

$d$ : épaisseur de la cavité

D'où :

$$\Delta Q = C_b \cdot E_C \cdot d \quad (\text{IV.6})$$

Dans le cas d'un diélectrique réel comportant  $n$  cavités on aura :

$$\Delta Q = E_C \cdot \sum_{i=1}^N C_{bi} \cdot d_i \quad (\text{IV.7})$$

• La d décharge partielle  $\Delta Q$  se manifeste à l'extérieur du diélectrique par une variation  $\Delta U$  de la tension aux bornes de l'objet.

La tension aux bornes de la vacuole peut également s'exprimer par :

$$u_c = u \cdot \frac{e_c \cdot \varepsilon_r}{e_c \cdot \varepsilon_r + e_b} \quad (IV. 8)$$

Où :  $e_c$ : épaisseur de la capacité de la vacuole = d

$e_b$  épaisseur de la capacité de l'isolation saine

$\varepsilon_r$  : Permittivité relative du diélectrique.

Le nombre de décharges N s'exprime par :

$$N = 4 \cdot f \frac{u_c - u_e}{u_i - u_c} \quad (IV.9)$$

Ou :  $f$ : fréquence de la tension appliquée

$u_i$ : tension d'amorçage

$u_e$  : tension d'extinction

#### IV .4. Méthodes de mesure des D.P

Elles sont de trois types : chimique, acoustique et électrique.

##### a- Méthode chimique

Se base sur la modification de la morphologie des matériaux. Elle est très peu sensible et d'un emploi très restreint.

##### b- Méthode acoustique

Les décharges électriques localisées à l'intérieur d'un vide produisent des ondes de pression ultrasoniques qui se propagent à travers le milieu isolant et atteignant l'enveloppe de l'équipement. Les transducteurs de pression convertissent les ondes de pression ultrasoniques en signaux électriques, ce qui aide à détecter et même localiser la source de D.P. On utilise les fibres optiques comme capteurs intrusifs.

### c- Méthode électrique

La tension et le nombre des impulsions de courant des D.P sont usuellement enregistrés et analysés. Même si cette méthode soit très précise, elle nécessite une alimentation à faible bruit, un calibrage et un environnement sans interférence.

**IV.4.1. la détection électrique directe :** cette méthode utilise le circuit de la figure (IV.3)

Le schéma de base du dispositif de mesure des D.P est :

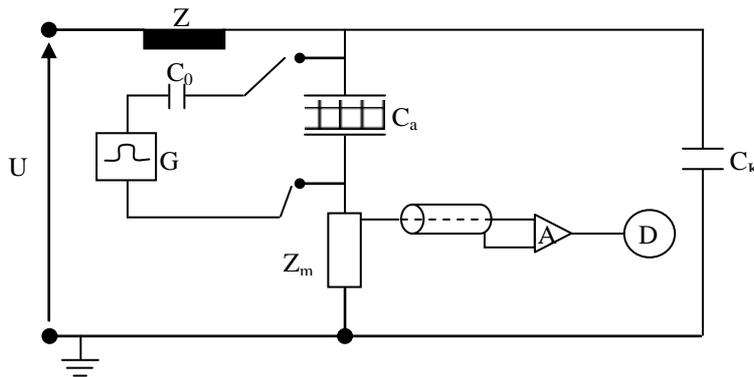


Figure IV.3 : Schéma de base du dispositif de mesure des D.P

Où  $Z$  : filtre chargé d'atténuer les perturbations provenant de l'alimentation.

$C_a$ : objet d'essai

$C_k$  : condensateur de liaison dépourvu de décharges partielles

$G, C_o$  : Calibrateur externe auxiliaire d'amplitude de décharges :

$$g_o = C_o \cdot u_g \quad (IV.10)$$

$Z_m$ : impédance de mesure

$A$  : amplificateur d'impulsion

$D$  : oscilloscope ou P.C

### ■ Calibrage

La mesure de la décharge  $Q$  se fait après calibrage de l'appareil de mesure d'amplitude de décharge au moyen du générateur auxiliaire ; avec  $U_{\text{alimentation}} = 0V$ .

- Le circuit est calibré par un générateur auxiliaire  $G$  calibré de (5, 50, 500 pc) en série avec une petite capacité  $C_o$ .

- La décharge  $g_o = C_o \cdot u_g$  est injectée dans l'échantillon  $C_a$ . ( $C_b$  peut être plus petite que  $C_a$ ) ; et à l'aide d'un oscilloscope permet de déterminer l'amplitude de la décharge calibrée.

- La décharge calibrée doit être injectée dans l'échantillon à  $U=0$ , et le calibrateur doit être déconnecté avant l'application de la H.T

- La mesure de l'amplitude des décharges  $Q$  s'effectue après amplification (A) à l'aide d'un détecteur (D).

Cette méthode de mesure est très sensible aux perturbations électriques provenant aussi bien du réseau d'alimentation que l'environnement de l'appareillage. Pour cela la mesure doit s'effectuer dans des cages blindées munies de filtres d'alimentation.

#### IV.4.2. la détection électrique indirecte

##### ■ La méthode "en pont de SCHERING"

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode directe (présence des perturbations externes), on fait appel à une méthode de mesure indirecte dite "en pont de SCHERING", permettant d'atténuer l'effet des perturbations électrique sur la mesure. Cette méthode utilise le circuit de la figure (IV.4)

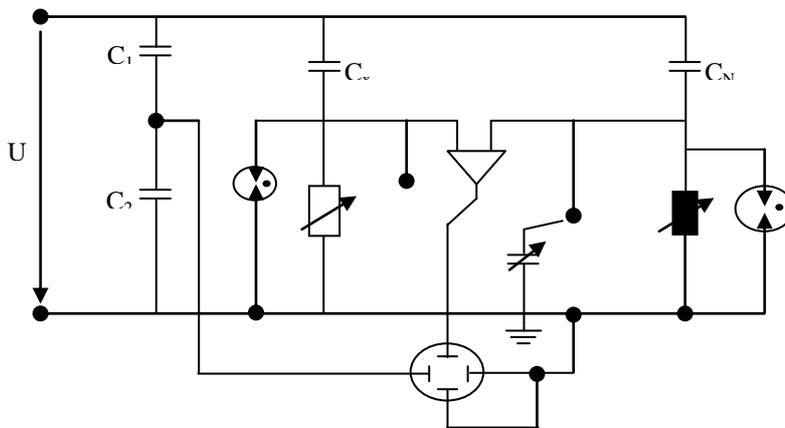


Figure IV.4 : Schéma du dispositif de mesure indirecte des D.P dite "en pont de SCHERING"

On injecte en abscisse de l'oscilloscope, une fraction de la haute tension sinusoïdale d'alimentation. Sur l'axe des ordonnées, on injecte les impulsions de décharges superposées à la fraction de la sinusoïde de la tension d'alimentation, le tout étant déphasé de  $90^\circ$  par rapport à la sinusoïde de l'abscisse. La représentation oscilloscopique en (x-y) donne une ellipse sur laquelle on voit apparaître les décharges partielles.

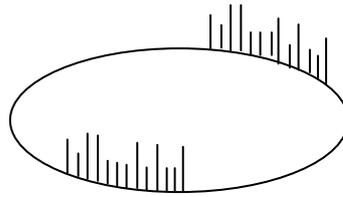


Figure IV.5 : Représentation oscilloscopique en (x-y) des décharges partielles.

Les étapes de calibrage et de mesure sont les suivants :

- Equilibrage du pont de mesure à l'oscilloscope pour la composante 50 Hz.
- Etalonnage de l'amplitude de décharges au moyen d'un générateur auxiliaire calibré à  $U_{\text{alimentation}} = 0 \text{ V}$
- Repérage de la position des décharges partielles par rapport aux crêtes de la sinusoïde d'alimentation haute tension.
- Etude de la représentation oscilloscopique des décharges partielles.

La représentation oscilloscopique permet de déterminer la profondeur et la forme géométrique des vacuoles contenues dans un isolant en fonction de la position, de la forme, de la fréquence et de l'amplitude des D.P.

### ■ Détection équilibrée

La méthode directe ne permet pas de distinguer entre les charges internes à l'échantillon et externes, pour remédier à cela, on utilise la méthode de détection équilibrée.

Dans la méthode de détection équilibrée, deux échantillons sont mesurés simultanément dans le circuit (figure IV.6).

- les deux échantillons a et à ont de préférence la même nature du matériau isolant, de sorte que leurs facteurs de perte  $\text{tg}\delta$  soient égaux dans la gamme du spectre de fréquence.

- Les capacités a et à ne sont pas nécessairement égales.
- Cependant les échantillons de même capacité donnent des résultats optimums.

Les décharge dans a et à sont détectées et les décharges externes (de K ou de la H.T) sont supprimées par injection d'une grande charge entre la H.T et la terre et en équilibrant le pont par réglage de R et C à la réponse minimale.

Les conditions d'équilibre sont :

$$\frac{R}{R'} = \frac{a}{a'} \text{ et } \frac{c}{c'} = \frac{a}{a'} \text{ et } \text{tg}\delta = \text{tg}\delta'$$

La qualité d'équilibre est donnée par le rapport m :

$$m = \frac{\text{réponse de décharge injectée dans a}}{\text{réponse de la même décharge injectée dans k}}$$

- exemple :**
- échantillons identiques  $\longrightarrow$  m=1000 à 5000
  - échantillons différents de même matériau isolant  $\longrightarrow$  m=100 à 500
  - échantillons différents  $\longrightarrow$  m= 3 à 30

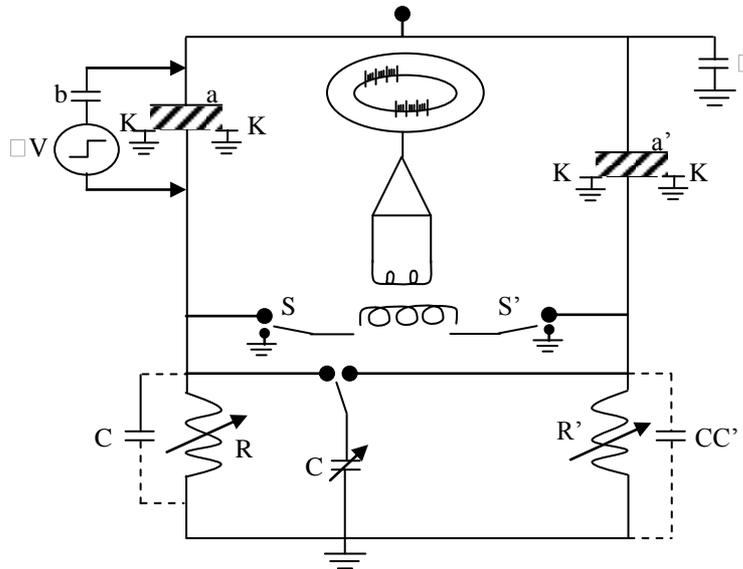


Figure IV.6 : Schéma du dispositif de détection équilibrée des DP

### ■ Traitement électronique

Les impulsions du coté gauches et du coté droit du pont sont traitées dans un discriminateur d'impulsions (figure IV.6.b)

Les impulsions qui arrivent au même instant, de même polarité (qui sont générées par des sources externes au circuit du pont) sont rejetées et les perturbations externes supprimées.

Les impulsions de polarités opposées sont acceptées.

Le rapport m est plus petit que celui du pont équilibré, mais la méthode présente un avantage de simplicité, la fixation de Z et Z' peut être utilisée et l'équilibrage n'est plus nécessaire.

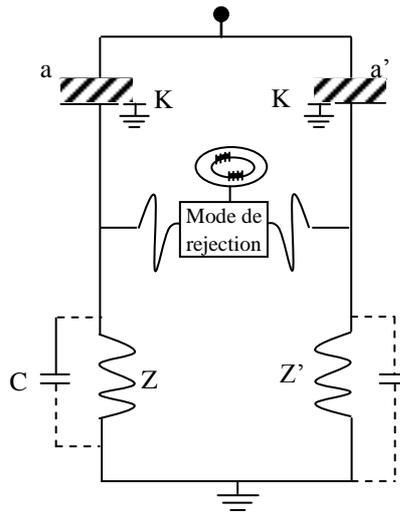


Figure IV.7 : Schéma du dispositif de sélection des DP par traitement électronique

Les deux méthodes (équilibrage et traitement électronique) sont utilisées pour des fins suivantes :

- 1- suppression des perturbations.
- 2- vérification de l'origine des décharges.
- 3- localisation des décharges

### ■ Suppression des perturbations

Si les échantillons sont bien isolés et s'ils sont raisonnablement égaux, la pleine sensibilité du détecteur de décharges est atteinte même en présence d'importantes perturbations.

L'utilisation d'une cage de Faraday pour supprimer les interférences n'est plus recommandée.

Des décharge inférieures à 0,03 pC ont été mesurées dan ce cas.

### ■ Vérification

La méthode de détection équilibrée a l'avantage de distinguer entre le signe de décharge résultant de l'échantillon ou bien de sources extérieures (source H.T, condensateur de couplage k, ou autre source).

Deux méthodes sont adaptées :

- 1- En variant légèrement les conditions d'équilibre, les décharges externes vont montrer une grande variation de la réponse en impulsion, alors que les décharges de l'échantillon restent inchangées.

2- En fermant les interrupteurs S et S', La réponse des impulsions externes augmente énormément, mais les décharges internes de l'échantillon a disparaissent si S est ouvert et demeurent les mêmes si S est fermé.

### ■ Localisation

La méthode de détection équilibrée est utilisée avec succès pour localiser le site de décharge dans les échantillons complexes (voir § IV.7).

## IV.5. Hauteur d'impulsion

### ■ Amplitude de la décharge

Mesurer la décharge revient à mesurer la quantité de charge déplacée, telle que :

$$\Delta Q = C_a \cdot \Delta u = C_b \cdot \Delta u_c = C_b \cdot u_c \quad (\text{IV.11})$$

Car  $\Delta u_c \approx u_c$

### ■ Dimension physique

L'intensité de la décharge Q peut être liée au volume occupé par la décharge tel que :

$$C_b = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d}; \quad (\text{IV.12})$$

Où S est la section plane de la vacuole (cavité) et  $e_c$  la profondeur de la cavité.

D'où :

$$\Delta Q = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S \cdot u_c \cdot \frac{1}{d} \quad (\text{IV.13})$$

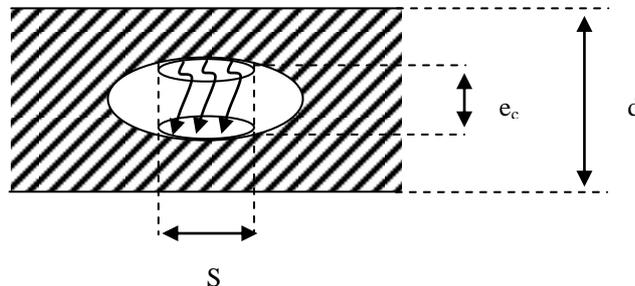


Figure IV.8 : Représentation de la cavité de décharge partielle

L'amplitude des décharges Q peut être calculée aussi bien à travers le volume de la cavité qu'à travers l'énergie P dissipée dans la décharge.

### ■ Energie de dissipation

L'énergie  $P$  de dissipation de la décharge peut être liée à l'amplitude de décharge  $q$  telle que :

$$P = \frac{1}{2} \cdot c_c (u_c^2 - u_i^2) = \frac{1}{2} c_c (u_c - u_i)(u_c + u_i) = \frac{1}{2} c_c \cdot \Delta u (u_c + u_i) \quad (\text{IV.14})$$

Comme :

$$u_c + u_i \approx u \quad (\text{IV.15})$$

Et comme :

$$u_c = \frac{c_b}{c_b + c_c} u_i \approx \frac{c_b}{c_c} u_i \quad (\text{IV.17})$$

Où :  $u_i$  est la tension d'amorçage

$$D'où : P = \frac{1}{2} \cdot c_b \cdot \Delta u_c \cdot u_i = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot u_i \quad (\text{IV.18})$$

Comme  $\Delta u_c$  croît avec l'augmentation de la longueur de l'intervalle de claquage,  $Q$ , croît avec  $s \cdot \Delta u_c$ , donc avec le volume de la décharge.

En conséquence du calcul précédent, l'intensité de décharge  $Q$  est représentée à la fois par l'énergie et le volume de la décharge qui est une bonne mesure de la décharge partielle.

### IV.6. Localisation des D.P dans les échantillons complexes

■ **La méthode de détection équilibrée** est utilisée avec succès pour localiser le site de décharge dans les échantillons complexes. Pour cela, la mise à la terre est interrompue en plusieurs places comme montré, par exemple, sur le câble de connexion de la figure (IV.9).

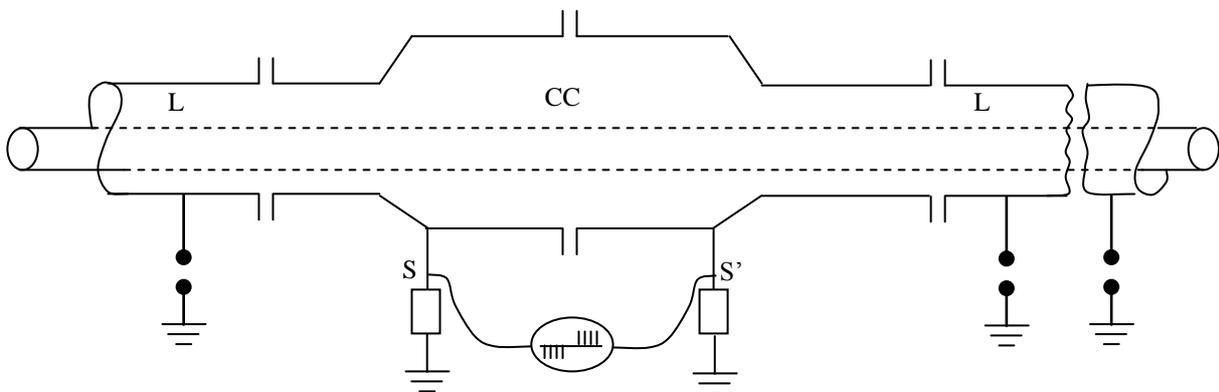


Figure IV.9 : Localisation du site de décharge dans les échantillons par la méthode de détection équilibrée

Le câble de connexion CC est divisé en deux parties et est séparé par les longueurs L de câble.

Les 2 cotés du câble de connexion CC sont mesurés dans le circuit d'équilibre. Les longueurs L du câble sont mises à la terre. Avec les interrupteur S et S', il est établi si la décharge est originaire du coté droit ou gauche de raccord de câble, on peut diviser et mesurer le raccord jusqu'à ce que le site de décharge soit localiser à quelque centimètre près.

### ■ Localisation par ondes mobiles

Deux ondes mobiles de vitesse  $\mathcal{V}$  démarrent à partir du site de décharge, une à gauche et l'autre à droite (la décharge est considérée comme une onde se déplaçant le long de la ligne à vitesse  $\nu$ ) figure (IV.10)

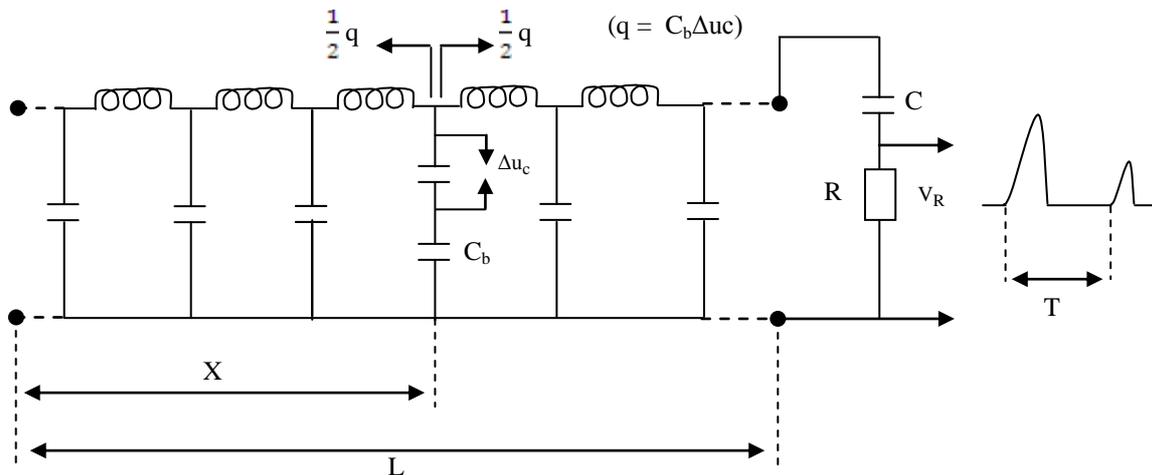


Figure IV.10 : Localisation des DP par ondes mobiles

Les ondes mobiles sont détectées par une impédance (résistance R pour éviter les distorsions de l'impulsion) à l'extrémité de la ligne. La haute tension de la ligne est bloquée par la capacité C.

La tension  $e$  à travers l'impédance  $Z$  de la ligne est :

$$e = \frac{1}{2} i \cdot z \quad (\text{IV.19})$$

où  $i$  est le courant au site de décharge.

Quand cette onde de tension arrive à l'extrémité de la ligne, la tension  $V_R$  au borne de la résistance de détection est :

$$V_R = \frac{2.R}{Z + R} \cdot e \quad (\text{IV.20})$$

Le bruit thermique de cette résistance est proportionnelle à  $\sqrt{R}$ . Pour un rapport optimal du signal de bruit, l'expression ;

$$\frac{V_R}{v_{\text{bruit}}} = \text{co.} \frac{2R}{(2 + R) \cdot \sqrt{R}}; \quad (\text{IV.21})$$

(Co= cst) ; doit être maximal,

$C_o$  : capacité de blocage

$$\text{Soit : } \frac{d}{dR} \cdot \frac{\sqrt{R}}{Z + R} + 0 \Rightarrow R = Z \quad (\text{IV.22})$$

La constante de temps  $\tau$  du circuit RC est choisie de sorte que la capacité de blocage  $C_o \approx \tau/R$  (environ 5nF).

Les impulsions sont observées sur un oscilloscope à large bande (de constante de temps de quelque ns)

La base de temps est enclenchée par les impulsions de décharge.

La mesure du temps de retard des réflexions d'ondes permet la localisation du site de décharge :

- Une des deux ondes mobiles atteint le détecteur et enclenche la base de temps.
- L'onde opposée se réfléchit à l'autre extrémité et arrive à T microsecondes plus tard.

Le temps d'arrivée de la 1<sup>ère</sup> onde est :

$$t = \frac{l - x}{v} \quad (\text{IV.23})$$

$$\text{Et celui de la 2<sup>ème</sup> onde est : } t_2 = \frac{l + x}{v} \quad (\text{IV.24})$$

$$\text{Le temps de retard est : } T = \frac{2x}{v} \quad (\text{IV.25})$$

Où : x est la distance du site de décharge à l'extrémité;

Et  $v$  est la vitesse de l'onde mobile.

La position de la décharge est localisée à 5 à 10m près dans les câbles HT de 1 à 2 km.

### ■ Détection de la D.P par technique de déviation

La décharge implique des pertes diélectriques et une augmentation soudaine de l'angle de perte révèle le grand nombre de décharge à la tension d'initiation  $U_i$  (fig 4.11)

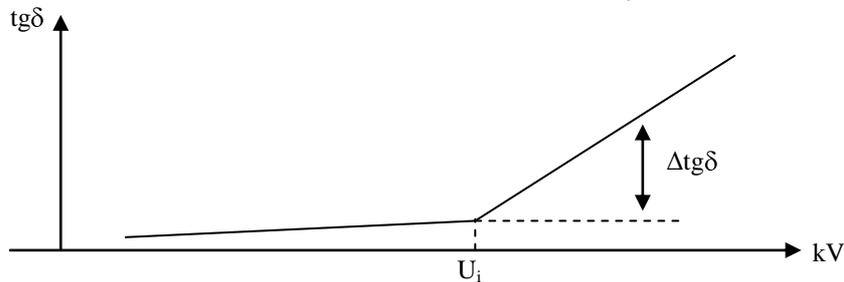


Figure IV.11 : Détection de la D.P par déviation de  $\text{tg}\delta(U)$

Les pertes diélectriques  $w_1$  calculées dans l'échantillon avec la capacité  $a$  (pont de Schering) sont :

$$w_1 = w.a.\text{tg}\delta.u^2 \quad (\text{IV.26})$$

L'énergie  $P$  dans une décharge est égale à :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2}} q.u_i \quad (\text{IV.27})$$

Si  $n$  décharges par alternance sont présentes, l'énergie de dissipation  $w_2$  est :

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} .q.u_i .2f.n \quad (\text{IV.28})$$

Maintenant  $W_1$  doit être égale à  $W_2$  à la tension d'initiation  $u = u_i$

On s'intéresse également à la plus petite décharge détectable qui correspond au plus petit accroissement de pertes  $\Delta\text{tg}\delta_{\min}$  qui peut être déterminé par le pont de Schering.

La sensibilité du pont de Schering pour  $n$  décharges par alternance est égale à :

$$q_{\min} = \sqrt{2}\pi.a.u.\Delta\text{tg}\delta_{\min} \frac{1}{n} \quad (\text{IV.29})$$

### ■ Localisation des D.P. par détermination du champ électromagnétique parasite

Dans le cas des échantillons (objet d'essai) sans mise à la terre, des radiations électromagnétiques sont transmises par les déplacements rapides des décharges partielles.

**Par exemple :**

- Isolateurs dans l'air
- Isolation en résine époxy des transformateurs et des disjoncteurs
- Les parties supérieures des extrémités de câble.

Une sonde à large bande peut être utilisée pour repérer les radiations électromagnétiques de l'isolation ; telles que les extrémités de câbles ou les isolateurs en résine époxy. La sonde P est déplacée le long de l'échantillon pour localiser le site de décharge (figure IV.12).

La sonde peut être capacitive ou inductive.

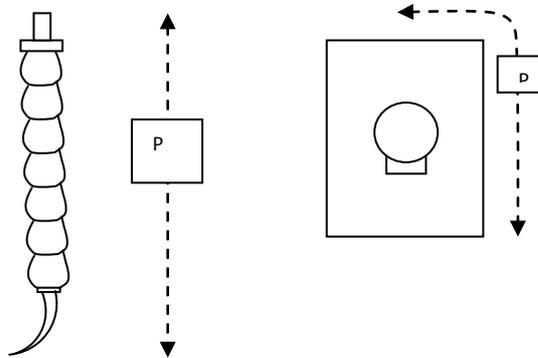


Figure IV.12 : Utilisation de la sonde à large bande pour repérage des radiations électromagnétiques de l'isolation

### IV.7. Ellipses de représentations des décharges partielles

La figure (IV.13) représente la configuration des décharges partielles en fonction de la structure des électrodes pour un niveau de tension de seuil d'amorçage des décharges partielles et pour un niveau plus élevés.

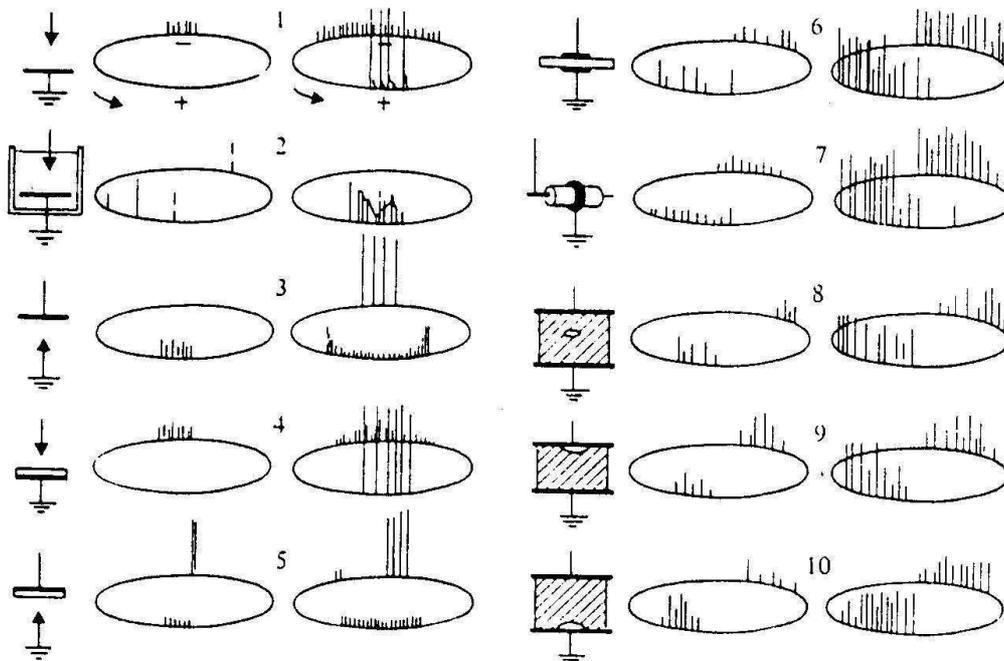


Figure IV.13 : Configuration des décharges partielles en représentation oscilloscopique

# Chapitre V

## MESURE DU CHAMP ELECTRIQUE

- V. Mesure de champ électrique
- V.1 La méthode directe
- V.2 Méthodes indirectes
  - V.2.1 Méthode de Wilson (sonde capacitive)
  - V.2.2 Voltmètre rotatif (moulin à champ)
  - V.2.3 Sonde de Tassiker
  - V.2.4 Cuve rhéographique
  - V.2.5 Méthode graphique

### V. Mesure de champ électrique

La mesure des champs électriques atmosphériques peut s'effectuer par :

- La méthode directe.
- Des méthodes indirectes.

#### VI.1. La méthode directe

La méthode directe consiste à déterminer le champ électrique  $E_T$  à la surface du sol, en mesurant la différence de potentiel  $U$ , entre un point d'altitude connue A et la terre B, au moyen d'un voltmètre électrostatique.

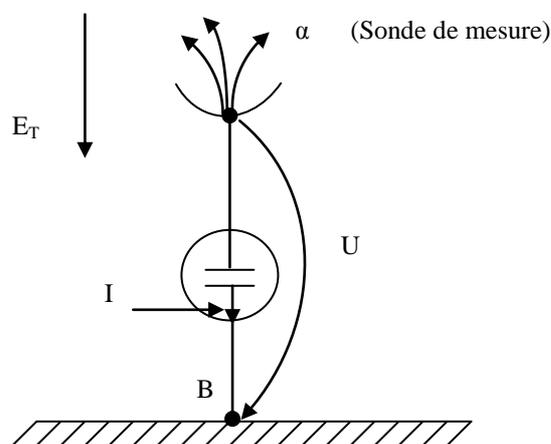


Figure V.1 : Méthode directe de mesure des champs électrique

Afin de permettre à la sonde voltmétrique d'acquérir le potentiel du point auquel elle se trouve, il faut augmenter localement la conductivité électrique de l'air, afin de délivrer un courant de mesure  $I$  suffisant. Pour cela, on place sur la sonde un égalisateur radioactif (substance émettrice de particules  $\alpha$  : noyau d'hélium  ${}^4_2\text{H}$  lourdes et peu pénétrantes, générées par des substances telles que l'uranium) ; car la conductivité de l'atmosphère est très faible :  $\sigma = 23.10^{-15} \text{ s/m}$

$$U = V_A - V_B = \int_A^B E_T \cdot dr \quad (\text{V}) \quad (\text{V.1})$$

$$\text{D'où : } E_T = \frac{U}{AB} \quad (\text{V/m}) \quad (\text{V.2})$$

On introduit un facteur de forme  $\eta$  pour corriger l'effet perturbateur de la sonde, tel que :

$$E_T = \eta \cdot E_{Tm} \quad (\text{V.3})$$

Avec :  $E_{Tm}$  : le champ mesuré.

$$\text{Et } \eta = \frac{E_h}{E_{\max}} = \frac{U}{E_{\max} \cdot d} \quad (\text{V.4})$$

$\eta$  : facteur de forme de Schwaigener

$E_h$  : champ électrique homogène entre deux électrodes distantes de  $d$ .

$U$  : la d.d.p entre les deux points de mesure.

### ■ Exemple 1 : facteur de forme dans le cas de deux cylindres concentriques :

Soit deux cylindres concentriques de rayons respectifs  $r_1$  et  $r_2$  et de longueur  $l$  séparés par un milieu diélectrique homogène.

Le théorème de Gauss appliqué à un cylindre de rayon  $r$  situé entre  $r_1$  et  $r_2$  donne :

$$Q = \int_s D \cdot ds = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E_r \cdot 2\pi \cdot r \cdot l \quad (\text{A.S}) \quad (\text{V.5})$$

Le champ électrique au rayon  $r$  vaut :

$$E_r = \frac{Q}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l \cdot r} \quad (\text{v/m}) \quad (\text{V.6})$$

La tension entre les deux cylindres sera alors :

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r \cdot dr = \frac{Q}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{v}) \quad (\text{V.7})$$

En éliminant  $Q$  entre les équations (V.6) et (V.7) on trouve :

$$E_r = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (\text{v/m}) \quad (\text{V.8})$$

$$E_{\max} \text{ est déterminé pour } r = r_1 \text{ et } E = \frac{U}{h} \frac{r_2 - r_1}{r} \quad (\text{V.9})$$

Soit :

$$\eta = \frac{Eh}{E_{\max}} = \frac{U}{U_{\max} \cdot d} = \frac{U / (r_2 - r_1)}{(U / r_1) / \text{Ln} \frac{r_2}{r_1}} = \frac{r_1}{r_2 - r_1} \text{Ln} \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{V.10})$$

### ■ Exemple 2 : facteur de forme dans le cas de deux cylindres parallèles

Soit deux cylindres parallèles A et B de rayon  $r_1$  distant de  $d$ .

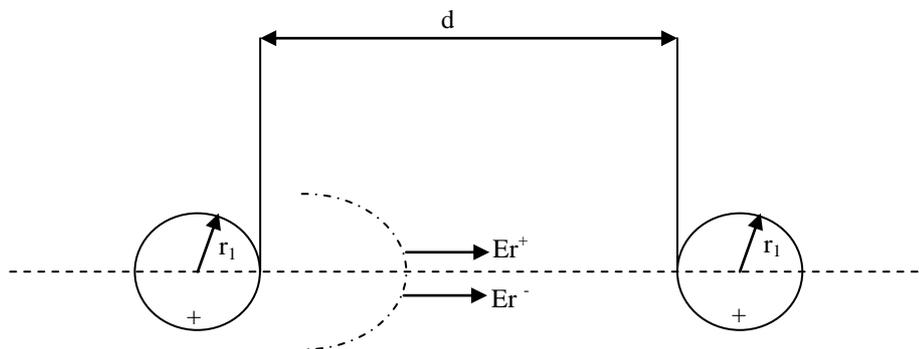


Figure V.2 : Dispositif des cylindres parallèles

D'après le théorème de Gauss :

$$Q : \int D \cdot ds = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E_r \cdot 2\pi \cdot r \cdot l \quad (\text{V.11})$$

Le champ électrique au rayon  $r$  vaut :

$$E_r = \frac{Q}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l \cdot r} \quad (\text{V.12})$$

En partant de l'équation (12) et en appliquant le principe de superposition, le champ résultant entre deux conducteurs de la ligne est égal à :

$$E_r = E_{r-} + E_{r+} = \frac{Q}{2\pi \epsilon \cdot l} \cdot \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{d + 2r_1 - r} \right) \quad (\text{v/m}) \quad (\text{V.13})$$

La tension entre les deux conducteurs vaut :

$$U = \int_{r_1}^{d+r_1} E_r \cdot dr = \frac{Q}{2\pi \cdot \epsilon \cdot l} \cdot \int_{r_1}^{d+r_1} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{d + 2r_1 - r} \right) \cdot dr \quad (\text{V.14})$$

$$\Rightarrow U = \frac{2Q}{2\pi \cdot \epsilon \cdot l} \cdot \text{Ln} \left( \frac{d + r_1}{r_1} \right) \quad (\text{v}) \quad (\text{V.15})$$

En remplaçant l'équation (V.15) dans l'équation (V.12) il vient :

$$E_r = \frac{U}{2 \text{Ln} \left[ \frac{(d + r_1)}{r_1} \right]} \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{d + 2r_1 - r} \right) \quad (\text{v/m}) \quad (\text{V.16})$$

Pour  $r = r_1$  ; on a  $E_{\max} (r = r_1)$

$$\text{Soit : } E_{\max} = \frac{U}{2 \text{Ln}[(d+r_1)/r]} \cdot \frac{d+2r_1}{r_1(d+r_1)} \quad (v/m) \quad (\text{V.17})$$

D'où le facteur de forme :

$$\eta = \frac{2r_1(d+r_1) \cdot \text{Ln}[(d+r_1)/r_1]}{d \cdot (d+2r_1)} \quad (\text{V.18})$$

Dans le cas où  $d+r_1 \gg r_1$  ; on peut écrire :

$$\eta = \frac{2r_1 \cdot \text{Ln}[(d+r_1)/r_1]}{d} \quad (\text{V.19})$$

## V.2. Méthodes indirectes :

### V.2.1. Méthode de Wilson (sonde capacitive)

La méthode de Wilson consiste à déterminer au moyen d'une sonde, le champ électrique  $E_{Tm}$ , à la surface du sol, en mesurant les charges électriques  $Q$  à la surface de celle-ci.

La sonde capacitive est un simple capteur circulaire incorporé au même niveau de surface, dans une électrode isolée d'elle à la surface de laquelle on veut mesurer le champ électrique.

Ce genre de sonde ne peut pas mesurer le champ électrique en présence d'une charge conduite.

Néanmoins, elle est bien adaptée à la mesure des champs rapidement variables. Cette sonde a été utilisée par Meek.

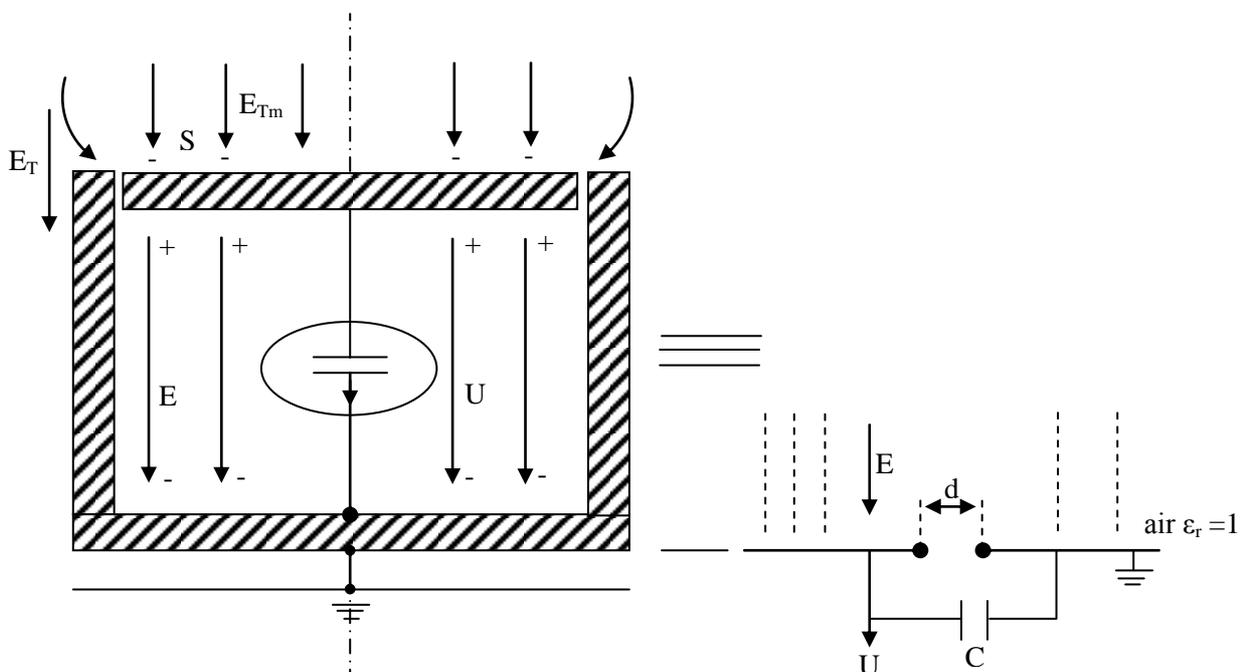


Figure V.3 : Sonde capacitive utilisée pour mesurer le champ électrique au niveau de la terre

(Méthode de Wilson)

$d$  est la distance entre la sonde et la capacité  $C$ , connue d'après sa géométrie.

La loi de Gauss nous permet d'écrire :

$$D.S = Q \Rightarrow \epsilon_0 . E . S = C . U \Rightarrow E = \frac{C.U}{\epsilon_0 S} \tag{V.20}$$

Ou :  $U$  : Potentiel de la sonde (mesuré à l'aide d'un oscilloscope relié à cette dernière).

$S$  : Section de la sonde.

$C$  : Capacité de la sonde (capacité de l'électrode de surface  $S$  contre le boîtier mis à la terre).

■ **Système plan :**  $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$  (V.21)

Le champ électrique  $E_{Tm}$  est donc égal à :

$$E_{Tm} = E = \frac{C.U}{\epsilon_0 S} \tag{V.22}$$

■ **Système cylindre :**  $C = \frac{2\pi . \epsilon_0 . l}{Ln \frac{r_2}{r_1}}$  (V.23)

■ **Système sphérique :**  $C = \frac{4\pi . \epsilon_0 . r_1 . r_2}{r_2 - r_1}$  ;  $r_2 - r_1 = d$  (V.24)

**V.2.2. Méthode du voltmètre rotatif (Moulin à champ) :**

La méthode du voltmètre rotatif pour la détermination du champ électrique  $E_{Tm}$  à la surface du sol est basée sur la mesure du courant  $i(t)$ , résultant de la variation de la capacité  $dC/dt$  entre un rotor tournant à la vitesse  $n$  et un stator fixe.

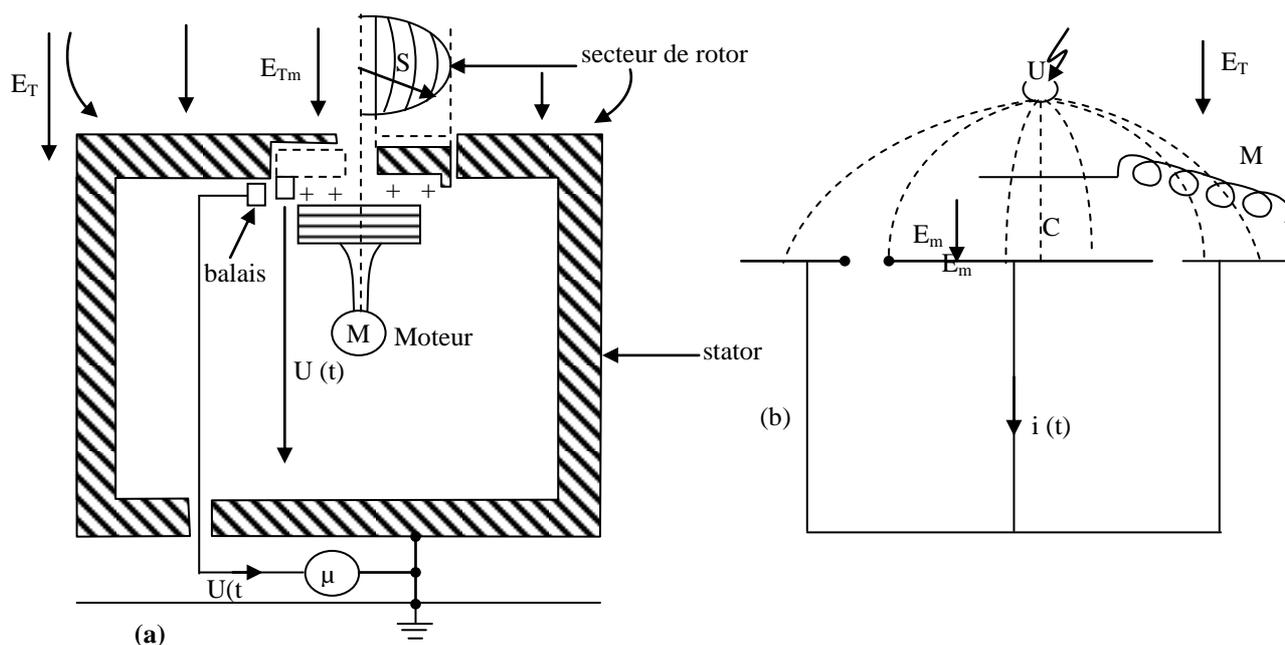


Figure V. 4 : Méthode du voltmètre rotatif

**a- Schéma (a) :**

Le secteur du moteur exerce un mouvement de rotation donné par le moteur M, à une vitesse  $n$  celui-ci passe périodiquement par la sonde fixe, avec laquelle il forme une capacité variable  $c(t)$ , qui engendre la circulation d'un courant de tenue  $i(t)$ .

Celui-ci est recueilli par des balais et passera à travers un microampèremètre qui permet sa lecture :

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(c(t).v(t)) \quad (\text{V.25})$$

$$v = cst \quad \Rightarrow i(t) = v \cdot \frac{dc(t)}{dt} \quad (\text{V.26})$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{S \cdot \epsilon_0} = \frac{I_{\text{moy}}}{\epsilon_0 \cdot n \cdot S} \quad (\text{V.27})$$

$$\text{Avec } I_{\text{moy}} = \frac{Q}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot dt \quad (\text{V.28})$$

**b- Schéma (b)**

La sonde S est portée à la terre, le plateau mobile (ou électrode de terre) constitue avec la sonde une capacité  $c(t)$  qui engendre une circulation de courant  $i(t)$ , qui s'écoule à la terre ; tel que :

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(c(t).v(t)) \quad (\text{V.29})$$

$$\text{Avec } q = \int_s \sigma(s) \cdot ds \quad (\text{V.30})$$

$$V \text{ est constante } \Rightarrow \text{ le courant } i = v \cdot \frac{dc}{dt} \quad (\text{V.31})$$

$$I_{\text{moyen}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot dt = \frac{Q}{T} \quad (\text{V.32})$$

Avec  $T = \frac{1}{n}$  ;  $n$  : vitesse de rotation du moteur qui engendre la rotation du plateau.

$$\text{Alors } Q(t) = \frac{I_{\text{moy}}}{n} \quad (\text{V.33})$$

$$\text{Soit } S = \frac{\pi \cdot r^2}{2} ; \text{ la surface du demi-secteurs } S \text{ du disque tournant.} \quad (\text{V.34})$$

$r$  : rayon du secteur tournant

Soit  $\rho$ , la densité de la charge surfacique du demi secteur lors du passage au droit de l'ouverture sectorielle du rotor :

$$\rho_s = \frac{Q(t)}{S} = \frac{I_{moy}}{n \cdot S} \quad (\text{V.35})$$

La densité de charge à la surface du moulin à champ électrique est donnée par le déplacement électrique.

$$\rho_s = D = \varepsilon_0 \cdot E_{Tm} \quad (\text{V.26})$$

D'où le champ électrique  $E_{Tm}$  est égal à :

$$E_{Tm} = \frac{\rho_s}{\varepsilon_0} = \frac{I_{moy}}{\varepsilon_0 \cdot n \cdot S_0} = \frac{2I_{moy}}{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot n \cdot r^2} \quad (\text{V} / \text{m}) \quad (\text{V.27})$$

### V.2.3. La sonde polarisée de Tassicker

La sonde polarisée est utilisée pour la mesure du champ électrique en présence d'une charge d'espace dans différents systèmes d'électrodes tels que : pointe-plan, fil-plan et fil-cylindre.

La sonde circulaire est un simple capteur incorporé dans un même niveau de surface d'une électrode généralement mise à la terre et sur laquelle nous désirons mesurer le champ électrique.

La sonde polarisée est constituée d'un plan circulaire de rayon ( $r_s$ ) et de surface ( $S$ ) centré au milieu d'une électrode E de rayons intérieur et extérieur respectivement  $r_e$  et  $R_e$ .

Les surfaces  $S_s$  et  $S_E$  des deux parties de la sonde sont au même niveau et forment un intervalle d'air annulaire de rayon  $g$ , tel que :

$$g = r_e - r_s \quad (\text{V.28})$$

Avec :  $S_E$  : surface du plan de mesure (E).

$S_s$  : surface de la sonde (s).

Le principe de fonctionnement d'une telle sonde consiste en la mesure du courant collecté par un élément de surface de la sonde, afin de déduire la densité du courant  $J$  qui la traverse.

La connaissance de la densité du courant permet d'accéder à la valeur du champ  $E$  au voisinage immédiat de cette surface et cela en partant de la relation de proportionnalité entre  $J$  et  $E$  donnée conformément à la loi d'Ohm :

$$J = \sigma \cdot E \quad (\text{V.29})$$

Où :  $\sigma$  est la conductivité de l'air.

La détermination du champ électrique est basée sur la mesure du courant  $I_s$  collecté par la surface de la sonde, ce courant peut s'écrire :

$$I_s = J \cdot S_s = \bar{\mu} \cdot \rho \cdot \frac{D \cdot S_s}{\epsilon_0} = \bar{\mu} \cdot \rho \cdot \frac{\varphi_s}{\epsilon_0} \quad (V.30)$$

Ave :  $\mu$  : la mobilité moyenne des porteurs de charge en  $m^2/V.s$ .

$\rho$  : la densité des porteurs de charge en  $C/m^3$ .

D : le vecteur de déplacement électrique.

$\varphi_s$  : Le flux du vecteur D.

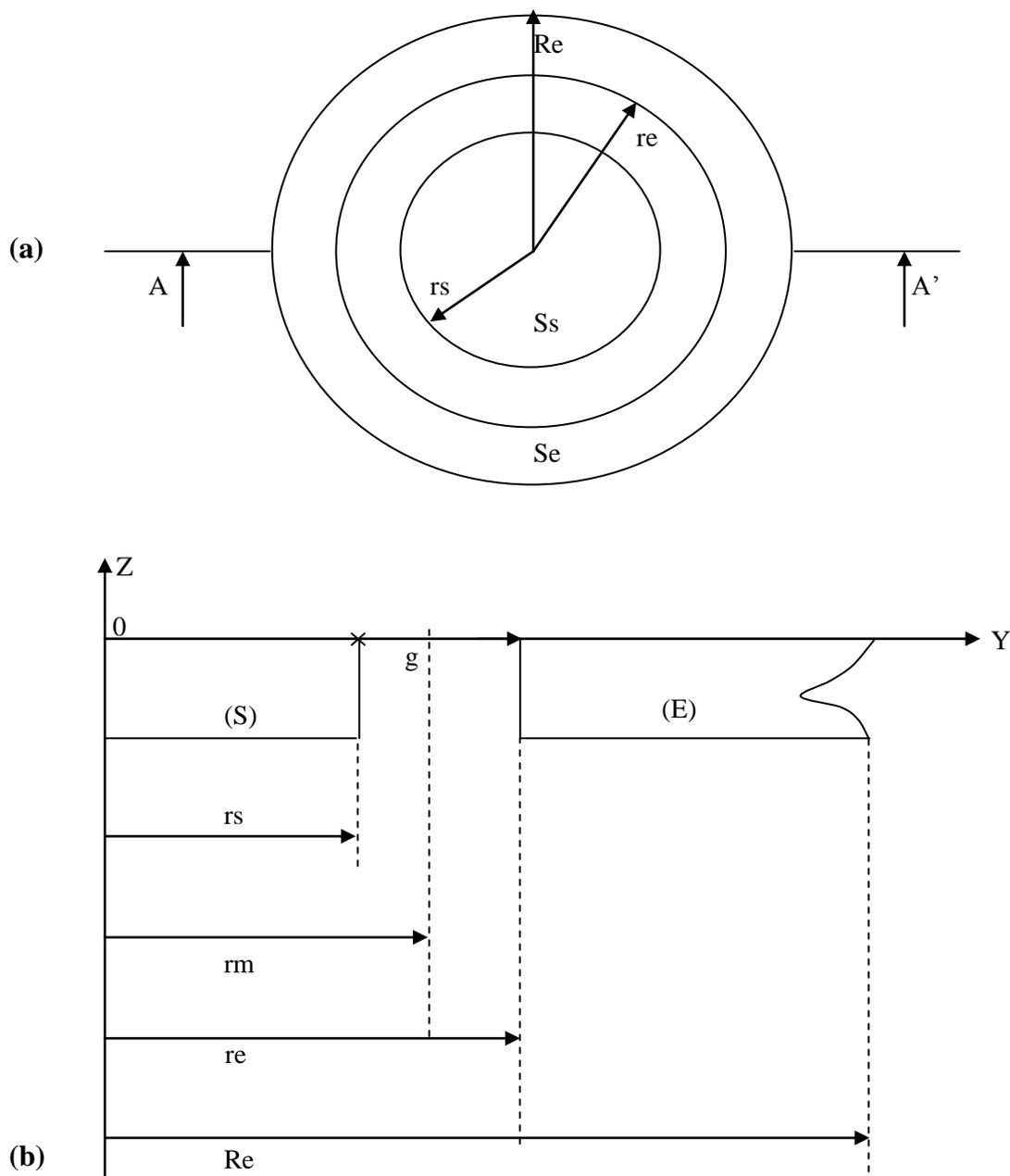


Figure V.5 : Sonde circulaire de Tassickar, (a) : vue de dessus et (b) coupe AA'

Dans le cas où la sonde n'est pas polarisée et en présence de la décharge couronne, les lignes de champ sont des droites parallèles (Fig. V. 6. a). La figure (V.6.b) donne la même représentation lorsque la sonde est polarisée et cela en l'absence de la décharge.

Et la figure (V.6.c) représente les deux phénomènes quand ils sont simultanés, c'est-à-dire, la décharge à lieu et la sonde est polarisée.

Dans ce cas, nous remarquons une déformation des lignes de champ qui ne sont plus parallèles.

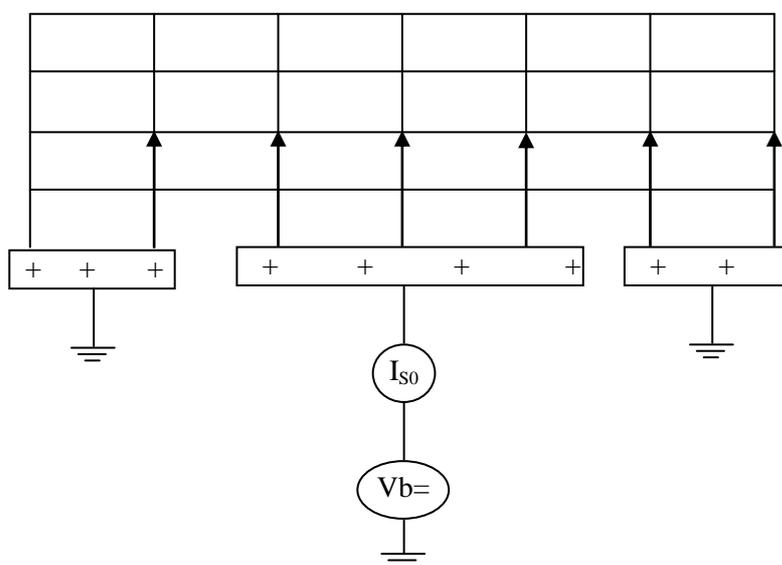


Figure V.6.a : Lignes de champ et équipotentiels en présence de la décharge

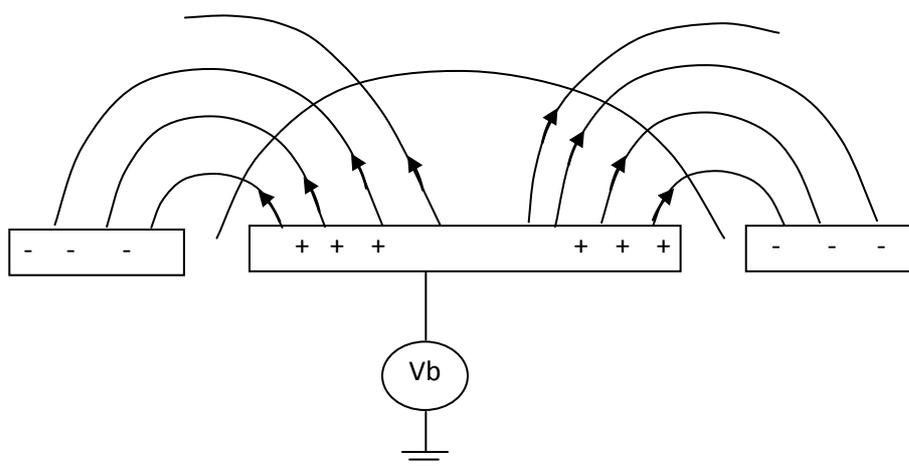


Figure V.6.b : Lignes de champ et équipotentiels en absence de la décharge avec la sonde qui est polarisée

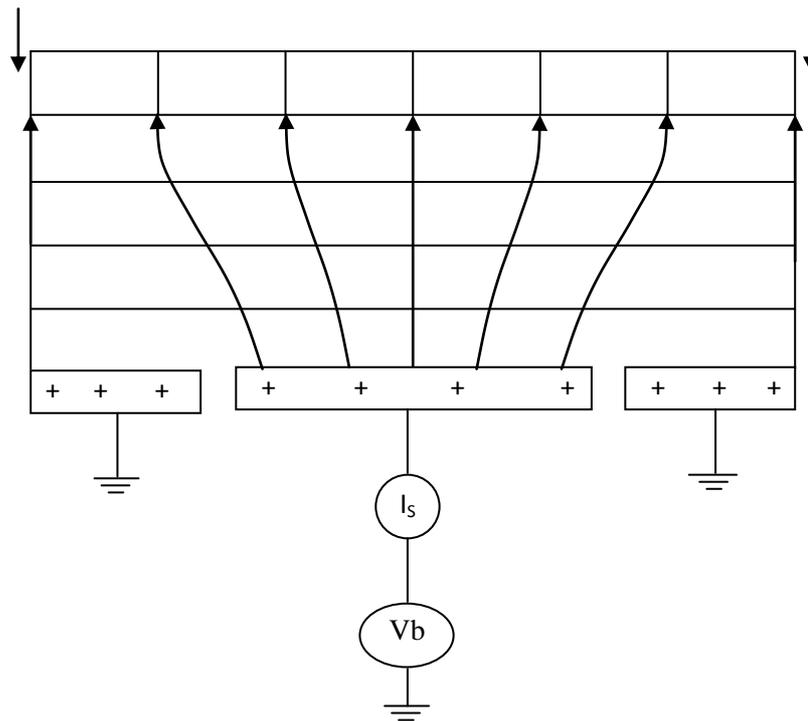


Figure V.6.c : Lignes de champ et équipotentiellles en présence de la décharge et de la polarisation

Lorsque la sonde est polarisée, nous avons alors deux contributions du flux  $\varphi_s$ . L'une provenant du champ électrique  $E$  à mesurer, l'autre de la tension de polarisation  $v_b$ .

$$\varphi_s = \varphi_{s0} + \varphi_I \quad (\text{V.31})$$

Où :  $\varphi_{s0}$  est le flux du champ  $E$  à mesurer et  $\varphi_{sI}$  ce lui du champ de polarisation  $E_b$ .

Ces flux composant sont données par ;

$$\varphi_{s0} = S_m \cdot E \cdot \epsilon_0 \quad (\text{V.32})$$

$$\varphi_{sI} = C_0 \cdot v_b \quad (\text{V.33})$$

$$\text{Ou } S_m = \pi \cdot r_m^2 \text{ est la surface effective de la sonde,} \quad (\text{V.34})$$

$r_m$  : étant son rayon effectif

Et  $C_0$  ; la capacité du condensateur constitué par la sonde (S) et l'électrode (E).

A partir des équations (V.31), (V.32) et (V.33) et en égard à la loi d'ohm, nous obtiendrons le rapport des courants  $I_s/I_{s0}$  correspondant respectivement à  $v_b \neq 0$  et  $v_b = 0$ .

$$\frac{I_s}{I_{s0}} = \frac{\varphi_s}{\varphi_{s0}} = 1 + \frac{C_0}{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_m^2} \times \frac{v_b}{E} \quad (\text{V.35})$$

La capacité  $C_0$  étant très petite ( $<1$  pf), sa mesure s'avère difficile pour le calcul de cette capacité, on utilise l'expression analytique de 'spence' donné par :

$$c_o = 4\epsilon_0 \left( 1,07944 + 0,5 \ln\left(1 + \frac{r_s}{2.g}\right) \right) \quad (\text{V.36})$$

La relation (V.35) donne la caractéristique  $I_s/I_{s0} = f(v_b)$  linéaire, cependant, aux fortes valeurs de  $v_b$ , lorsque le champ de polarisation devient supérieur au champ électrique  $E$  à mesurer, il se produit une déviation de la caractéristique par rapport à la linéarité, l'étude expérimentale développée par TASSICKER montrait cette tendance.

### ■ Théorie de Selim et Waters

Une analyse quantitative plus précise des performances de la sonde polarisée de Tassicker, portant sur la distribution du champ de polarisation  $E_b$  sur la surface de la sonde, a été développée en 1980 par Selim et Waters. Ils considèrent dans leurs théories deux cas selon la polarité de la tension de polarisation  $V_b$ .

#### a- cas où $E_b$ est opposé à $E$

Dans ce cas le champ résultant s'inverse en un point  $r_1$  appartenant à la sonde (s) (fig V. 7.a). Le flux à travers la sonde lorsqu'une tension  $V_b$  non nulle est appliquée est donnée par :

$$\varphi_s = 2\pi.\epsilon_0 \int_0^{r_1} (E - E_b) r.dr \quad (\text{V.37})$$

Avec  $r_1$  est le point appartenant à la sonde où  $E + E_b = 0$

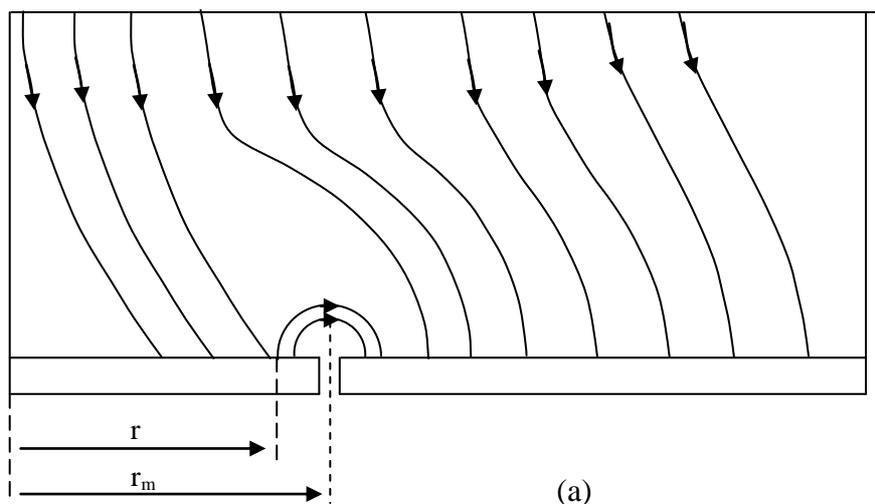


Figure V 7.a : Distribution du flux à la surface de la sonde

a : la sonde est polarisée négativement.

**b- Cas où  $E_b$  s'ajoute à  $E$** 

Pour  $V_b = 0$ , le flux à travers la sonde (s) est donné par :

$$\varphi_0 = \pi \cdot r_m^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E \quad (\text{V.38})$$

A partir des équations (V.37) et (V.38) on peut tirer le rapport des courants  $I_S/I_{S0}$ .

$$\frac{I_S}{I_{S0}} = \frac{\varphi_S}{\varphi_{S0}} = \frac{2}{r_m^2 \cdot E} \cdot \int_0^{r_1} (E - E_b) \cdot r \cdot dr \quad (\text{V.39})$$

Dans ce cas, l'inversion du champ se produit sur la surface de l'électrode (E) à un rayon  $r_3$  tel que  $E + E_b = 0$  (fig. V. 7. b).

Dans ce cas, le rapport des courants est donné par :

$$\frac{I_S}{I_{S0}} = \frac{\varphi_S}{\varphi_{S0}} = [E \cdot R_e^2 - 2 \int_{r_3}^{R_e} (E - E_b) \cdot r \cdot dr] / E \cdot r_m^2 \quad (\text{V.40})$$

Les deux équations (V.39) et (V.40) sont équivalentes à l'équation (V.35) donnée par Tassicker lorsqu'on approxime successivement  $r_1 = r_m$  (à  $V_b = 0$ ) et  $r_3 = r_m$  (à  $V_b > 0$ ).

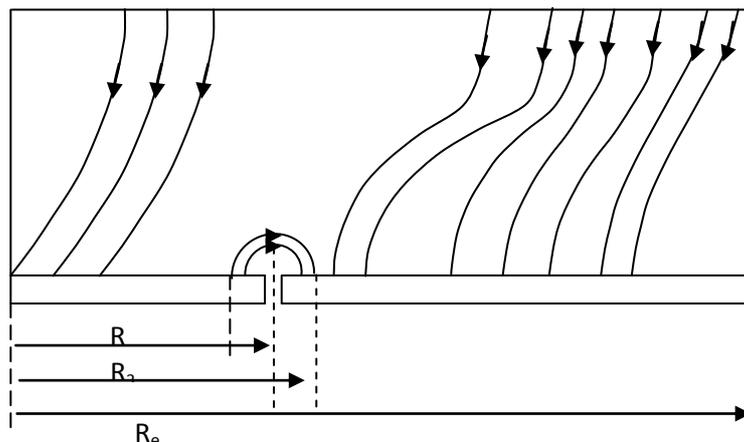


Figure V. 7.b : Distribution du flux à la surface de la sonde

(b) : La sonde est polarisée positivement

L'utilisation de ces deux équations nécessite un calcul du champ de polarisation  $E_b$ .

### ■ Mode opératoire

- L'électrode active est alimentée par une haute tension  $V$  (kV).
- La polarisation du plan (E) (positive ou négative) est assurée par une alimentation basse tension stabilisée et continue ( $\pm V$ ). Un voltmètre assure la mesure de la tension  $V_b$ .

-La valeur du champ électrique au plan est déduite à partir du courant  $I_S$  provenant de la décharge. Ce courant est collecté par la sonde reliée à un pico- ampèremètre par un câble coaxial blindé.

-La détermination du rapport des courants  $I_S$  et  $I_{SO}$  ( $I_S/I_{SO}$ ) correspond respectivement à  $V_b \neq 0$  et à  $V_b=0$  volt pour des tensions de polarisation positive et négative de  $-V_b$  à  $+V_b$  (volt), à tension  $V$  appliquée en (kV) à l'électrode active constante.

-la caractéristique  $I_S/I_{SO} = f(V_b)$  est linéaire et permet la mesure du champ électrique au plan par la méthode de la sonde à partir de l'équation suivante :

$$\frac{I_S}{I_{SO}} = 1 + \frac{c_o}{\pi \cdot r_m^2 \cdot \epsilon \cdot E} \cdot v_b \quad (\text{V.41})$$

La pente de cette droite est :

$$p_e = \frac{c_o}{\pi \cdot r_m^2 \cdot \epsilon_0 \cdot E} \quad (\text{V.42})$$

$$\text{Avec } c_o = 4 \epsilon_0 \left[ 1,07944 + 0,05 \ln \left( 1 + \frac{r_s}{2 \cdot g} \right) \right] \text{ (équation de spence)} \quad (\text{V.43})$$

La valeur du champ est donnée par :

$$E = \frac{c_o}{p_e \cdot \pi \cdot r_m^2 \cdot \epsilon_0} \quad (\text{V.44})$$

$p_e$  : déterminé sur la caractéristique  $I_S/I_{SO}$ .

- La densité du courant de décharge  $J$ , lorsque la sonde n'est pas polarisée ( $V_b=0$ ) est donnée par :

$$J = \frac{I_{s0}}{S_m} \quad (\text{V.45})$$

Avec  $I_{SO}$  : le courant de décharge collecté par la sonde (s) à  $V_b=0$ .

$$S_m = \pi \cdot r_m^2 \text{ est la surface effective de la sonde} \quad (\text{V.46})$$

$$r_m = \frac{(r_e - r_s)}{2} + r_s \text{ est le rayon effectif de la sonde} \quad (\text{V.47})$$

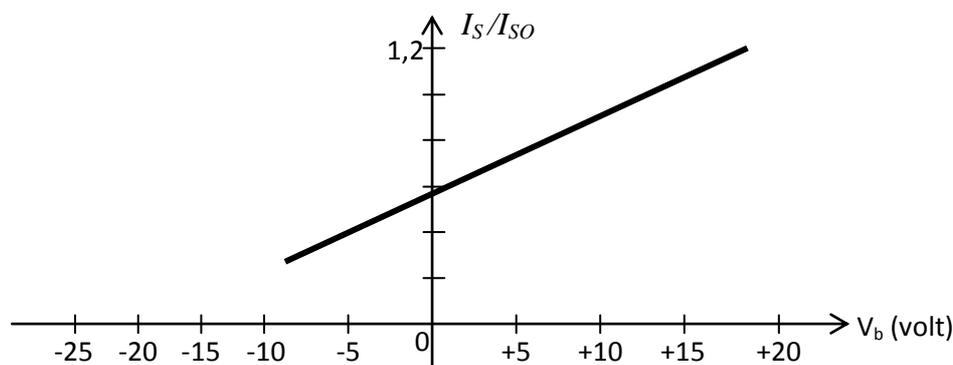


Figure V.8 : Caractéristique  $I_S / I_{SO} = f(v_b)$

### ■ Exemple d'application

Pour des tensions de polarisation positives et négatives de -30 à +30V et une tension  $V = 26$  kV appliquée à l'électrode active, on détermine le rapport des courants  $I_s$  et  $I_{SO}$  correspondant respectivement à  $V_b \neq 0$  et  $V_b = 0$  volt, et ce pour une sonde de caractéristique :  $r_s = 2,225$  mm et  $g = 0,015$  mm ; et à différentes distances  $d$  (m).

La caractéristique  $I_s/I_{SO} = f(v_b)$  est représentée sur figure (V.9). La valeur de la capacité  $C_o$  est :

$$C_o = 4\varepsilon_0 \cdot [1,07944 + 0,5 \ln(1 + \frac{r_s}{2 \cdot g})] = 0,25491 / (pF) \quad (V.48)$$

$$\text{Or: } \frac{I_s}{I_{SO}} = 1 + \frac{C_o}{\pi \cdot r_m^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E} V_b \quad (V.49)$$

$$\text{Avec: } p_e = \frac{C_o}{\pi \cdot r_m^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E} \quad (\text{pente de la caractéristique } I_s/I_{SO} = f(v_b)) \quad (V.50)$$

Nous obtenons :

$$E = \frac{1841,2}{P_e} (kV / m) \quad (V.51)$$

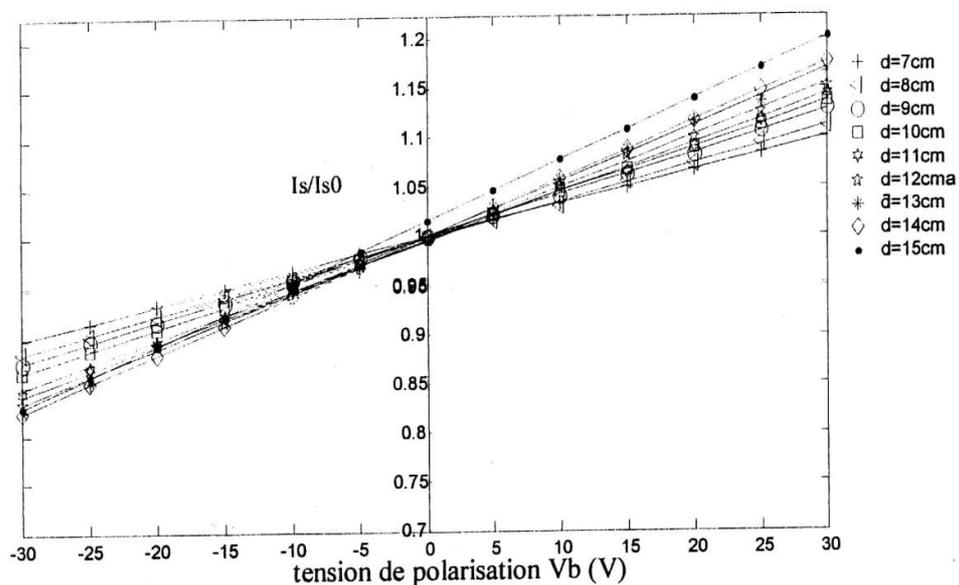


Figure V.9. : Les caractéristiques  $I_s/I_{SO} = f(V_b)$  avec une tension appliquée égale 26 kV

#### V.2.4. La cuve rhéographique ou électrolytique

La cuve isolante est remplie d'une solution électrolytique (ex : eau salée); deux électrodes sont placées dans la solution et portées à une tension  $V$  faible.

Les lignes équipotentiels et de champ sont alors déterminées moyennant une sonde sonore alimentée à différentes tension à partir d'un diviseur de tension muni d'un indicateur zéro.

En guidant la sonde le long des lignes potentielles, leur graphisme peut être réalisé manuellement ou automatiquement dans un système à deux dimensions (fig.V.10)

Pour le calcul du champ électrostatique, on suppose qu'entre deux équipotentiels, il existe une répartition uniforme du champ électrostatique. Ainsi, on peut calculer le champ en calculant la différence de potentiel  $\Delta U$  entre deux équipotentiels et en la divisant par la distance "d" entre les deux équipotentiels.

$$E = \frac{\Delta u}{d} = \frac{u_2 - u_1}{d} \quad (\text{V.52})$$

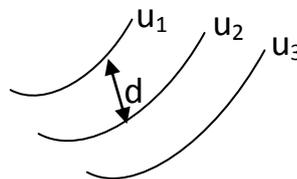


Figure V.10 : Allure des équipotentiels

Un système 3D peut être réalisé dans le cas d'une cuve inclinée avec électrodes à symétrie rotationnelle (cylindre ou sphère).

Le fond de la cuve et le niveau horizontal de l'eau (électrolyte) forment un angle représentant l'angle de la configuration concentrique (fig.V.11).

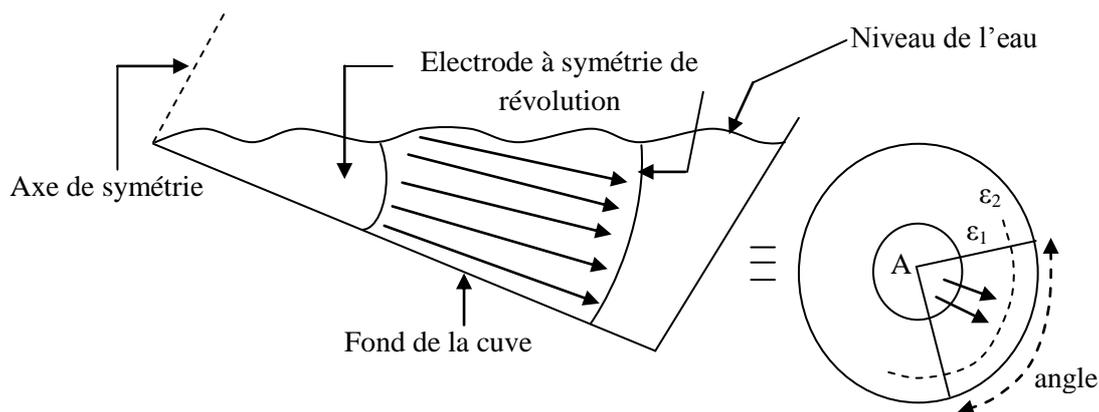


Figure V.11 : Représentation du système 3D

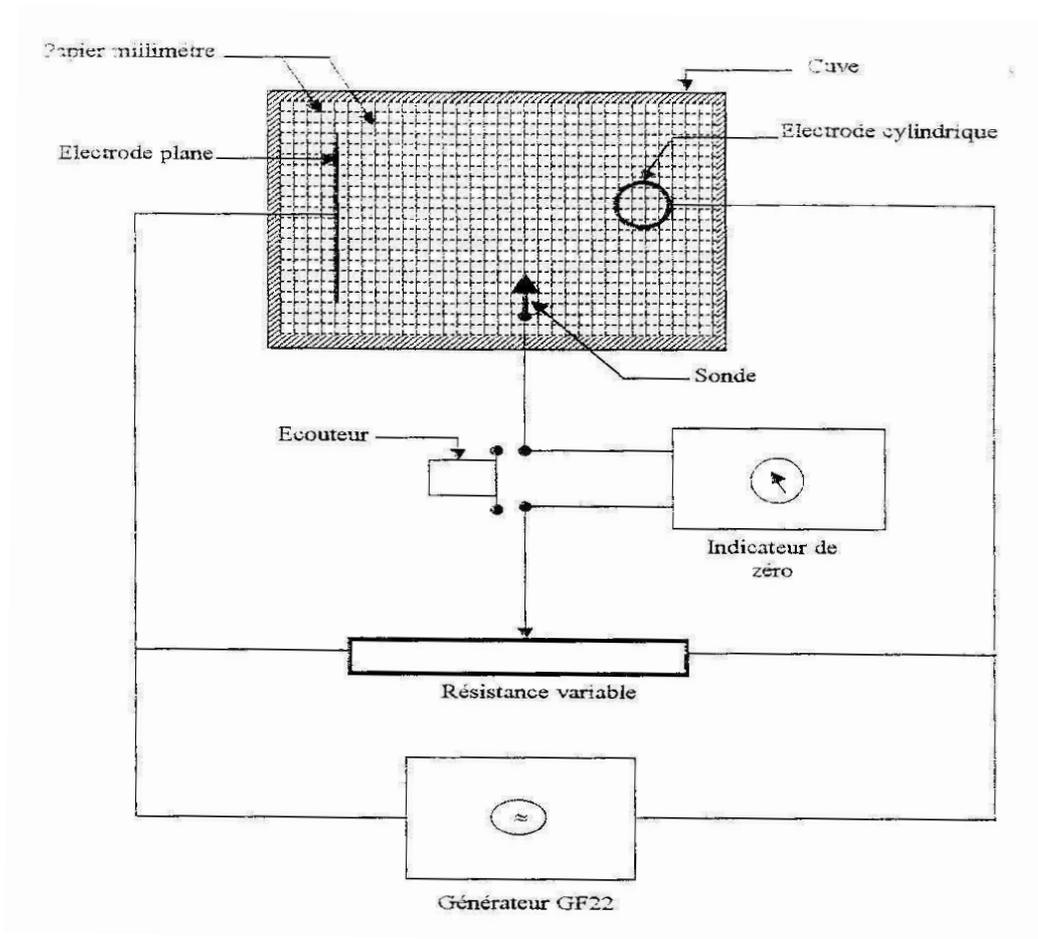


Figure V. 12 : Circuit d'essai de la cuve électrolytique

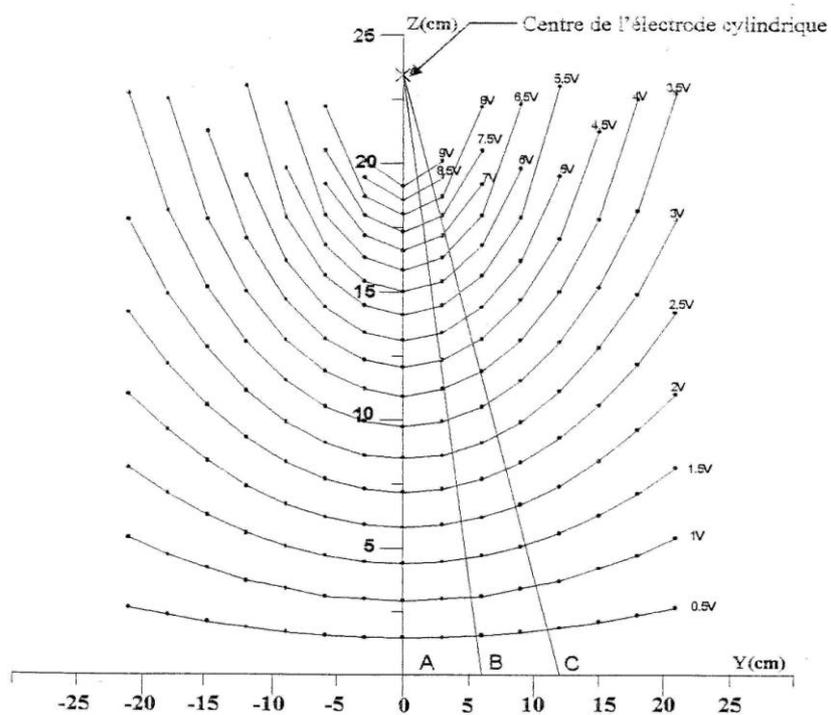


Figure V. 13 : Allure des équipotentiels obtenus par la cuve électrolytique

### V.2.5. La méthode graphique

Cette méthode utilise le fait que, dans un système à deux dimensions ou à système de rotation, les lignes de flux et les lignes équipotentielles forment un système orthogonale de courbes. Cette méthode consiste à relever à la main, cette famille de courbes orthogonales pour des champs électriques ou magnétique ; ce qui revient à esquisser des carrés curvilignes de la famille d'équipotentielles et lignes de champ en commençant par des régions de champ uniforme facile à dessiner et en s'avancant vers les régions de champ non uniforme. Les erreurs sont corrigées au fur et à mesure.

En représentant la condition que pour chaque carré, la distance entre deux équipotentielles doit être égale à l'épaisseur 'e' du tube de flux.

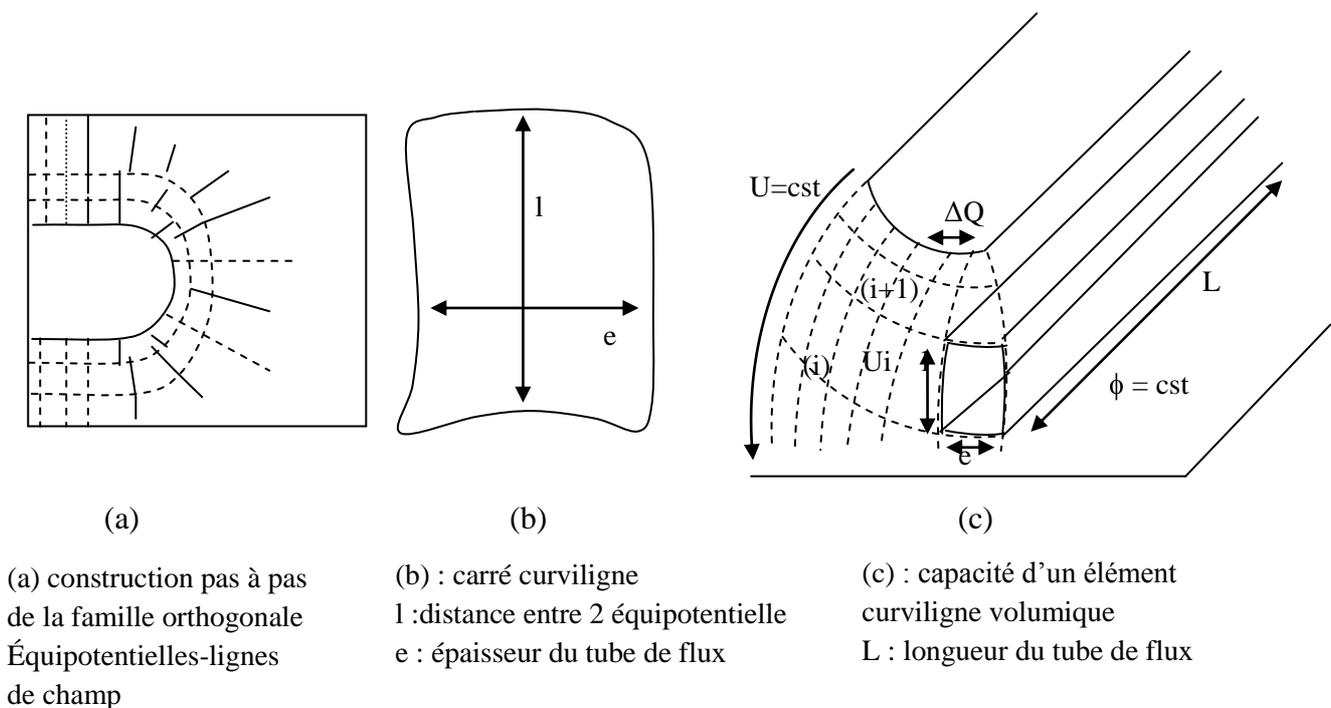


Figure V.14 : Représentation de la méthode graphique

La capacité d'un élément de volume de longueur  $L$  sera approximativement celle d'un condensateur plan :

$$c_v = \xi_o \cdot \xi_r \cdot \frac{S}{l} \quad (\text{V.53})$$

Dont la surface des plaques est égale à :

$$S = e.l. \quad (\text{V.54})$$

Ce qui donne pour la capacité linéique de l'élément de volume, en tenant compte de la condition de Lehmann :

$$\frac{e}{l} = 1 \quad (\text{V.55})$$

$$c_v^l = \frac{c_v}{L} = \xi_o \cdot \xi_r \quad (\text{V.56})$$

Dans le cas d'une structure spéciale à symétrie de rotation ; on a :

$$e \cdot 2\pi \cdot \frac{r}{l} = 1 \quad (\text{V.57})$$

Où r est la distance du centre du carré curviligne à l'axe de système de rotation.

La capacité linéique totale du volume considéré sera alors égale à :

$$c_t^l = \xi_o \cdot \xi_r \frac{N_p}{N_s} \quad (\text{V.58})$$

Où  $N_p$  est le nombre de carrés en parallèle et  $N_s$  le nombre de carrés en série dans le volume.

En connaissant l'ordre des équipotentiels  $i$  et  $i+1$ , il est facile de déduire la différence de potentiels  $U_i$ .

Le champ électrique moyen dans le carré désiré sera alors :

$$E_i = \frac{u_i}{l} \quad (\text{V.59})$$

On peut ainsi calculer le champ moyen dans n'importe quelle région couverte par le relevé graphique.

La précision étant fonction de la densité de maillage dessiné.

Les flux électriques entre deux lignes de champ sont égaux :

Soit :

$$\Delta Q = e \cdot l \cdot \xi_o \cdot \xi_r \cdot E = D \cdot ds \quad (\text{V.60})$$

$$D = \xi_o \cdot \xi_r \cdot E \quad (\text{V.61}) \quad \text{et} \quad S = e \cdot L \quad (\text{V.62})$$

La d.d.p entre deux lignes équipotentiels voisines est égale à :

$$\Delta\varphi = E \cdot l \quad (\text{V.63})$$

$$\text{On pose : } k = \xi_r \cdot \frac{e}{l} \quad (\text{V.64})$$

$$\text{Pour } \frac{e}{l} = 1 \Rightarrow k = \xi_r \quad (\text{V.65})$$

Pour une épaisseur  $e_l$  à un point donné, le champ électrique en ce point est alors :

$$E_l = \frac{\Delta\varphi}{e_l} = \frac{\Delta\varphi}{l_l} \quad (\text{V.66})$$

Si  $m$  est le nombre d'équipotentiels désirées (sans compter l'électrode surface) la tension totale appliquée est :

$$u = (m + 1)\Delta\varphi \quad (\text{V.67})$$

Et si le nombre de lignes de champ désirées est  $N$  la charge totale est donnée par :

$$Q = n \cdot e_1 \cdot L \cdot \xi_o \cdot \xi_r \cdot E_1 \quad (\text{V.68})$$

La capacité du système est alors :

$$C = \frac{Q}{u} = \frac{n}{m + 1} \cdot k \cdot L \cdot \xi_o \quad (\text{V.69})$$

En Trois dimensions (3D), et en système à symétrie de rotation ; on peut écrire :

$$\xi_r \cdot \frac{\ell}{e} \cdot r = k \quad (\text{V.70})$$

Où  $r$  ; est la distance du centre de l'élément de volume à l'axe de système de rotation.

### Inconvénient de la méthode

Cette méthode nécessite la connaissance de la configuration du champ.

# Chapitre VI

## MESURE DES RESISTIVITES SUPERFICIELLES ET TRANSVERSALES DES ISOLANTS

### VI Mesures de résistance et de résistivité

#### VI.1 Résistance transversale

#### VI.2 Résistivité transversale

#### VI.3 Résistance superficielle

#### VI.4 Résistivité superficielle

#### VI.5 Résistance de terre

#### VI.5.1 Méthode de mesure à 3 pôles

#### VI.5.2 Méthode de mesure à 4 pôles (méthode "de Wenner")

#### VI.5.3 Mesures sélectives par pince ampèremétrique

#### VI.5.4 Mesures sans piquet de terre

#### VI.5.5 Méthode de mesure à 2 pôles

### VI. Mesures de résistance et de résistivité

#### VI.1 Résistance transversale (en tension continue)

La résistance transversale  $R_t$  mesurée entre deux électrodes apposées sur deux faces opposées d'un échantillon est le quotient de la tension continue appliquée aux électrodes par la partie du courant qui traverse l'isolant entre ces électrodes.

$$R_t = \frac{U_{cc}}{i}$$

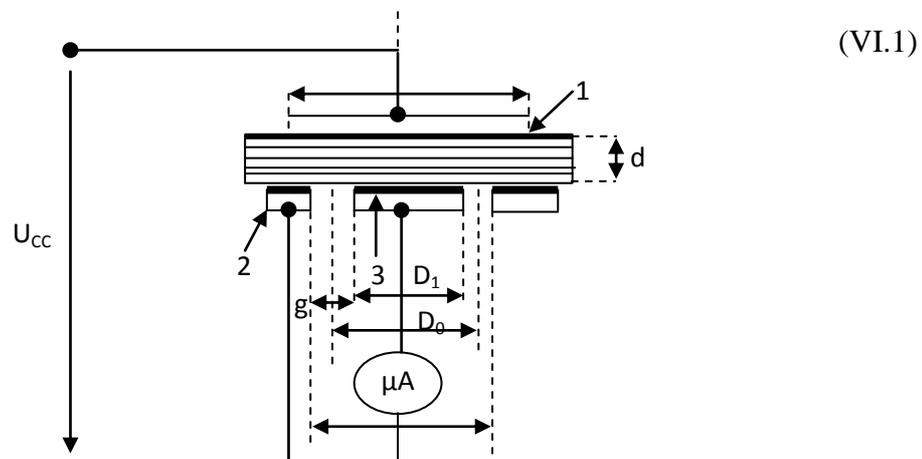


Figure VI.1 : Principe de mesure de la résistance transversale.

- 1: Electrode
- 2: Anneau de grade servant à éliminer, de la mesure, les courants de surface
- 3: Contre-électrode.

**VI.2. Résistivité transversale (en tension continue)**

La résistivité transversale d'un matériau  $\rho_{cct}$  est le quotient du gradient de potentiel par la densité de courant qui le traverse, ce qui donne :

$$\rho_{cct} = s_t \cdot R_t / d \tag{VI.2}$$

Où :  $s_t = \pi D_0^2 / 4$  (V.I.3) et  $D_0 = (D_1 + D_2) / 2$  (VI.4)

**VI.3. Résistance superficielle (en tension contenue)**

La résistance superficielle  $R_s$  mesurée entre deux électrodes appliquées sur la même face d'un échantillon est le quotient de la tension continue appliquée aux électrodes par la partie du courant à travers la mince couche d'humidité (pollution) qui pourrait exister à la surface de l'isolant et dans les couches superficielles de ce dernier.

$$R_s = \frac{U_{cc}}{i} \tag{VI.5}$$

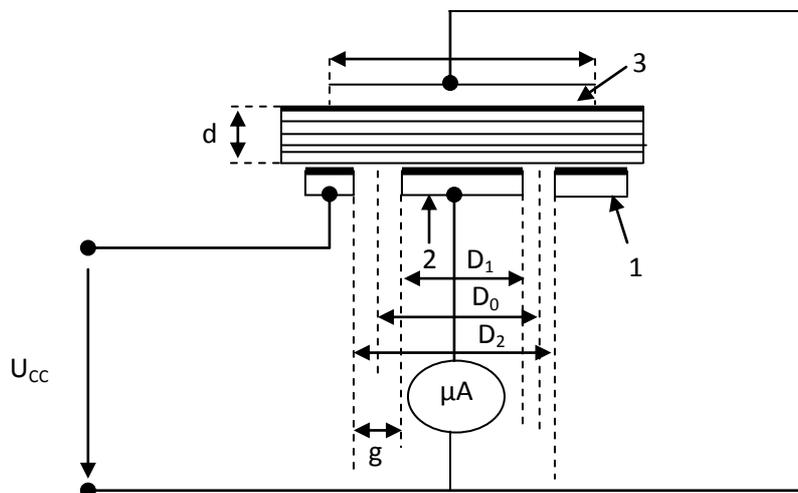


Figure VI. 2 : Principe de mesure de la résistance superficielle

- 1 : électrode ; 2 : contre -électrode
- 3- anneau de garde servant à éliminer de la mesure les courants transversaux.

**VI.4. Résistivité superficielle (en tension continue)**

La résistivité superficielle d'un matériau isolant  $\rho_{ccs}$  est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur ; soit :

$$\rho_{ccs} = p \cdot R_s / g . \tag{VI.6}$$

$$P = \pi.D_0 \tag{VI.7}$$

P est le périmètre moyen entre l'électrode et la contre – électrode.

Avec :  $D_0 = (D_1 + D_2)/2$  et  $g = (D_2 - D_1)/2$ . (VI.8)

### VI.5. Résistance de terre

La prise de terre est une protection des installations électriques par l'évacuation des charges dans la terre. La résistance de terre doit être la plus petite possible pour que le courant puisse circuler librement. La résistance de la terre dépend de la structure géologique.

#### VI.5.1. Méthode de mesure à 3 pôles

La résistance de la terre est mesurée par la méthode des trois sondes. E(ou  $R_x$ ), S( ou  $R_s$ ) et H( ou  $R_m$ ).

Où,  $R_x$  : résistance de prise de terre,

$R_s$  : résistance de la sonde auxiliaire S,

$R_m$  : résistance de la sonde de mesure H.

On se sert d'un voltmètre pour mesurer la différence de potentiel entre E(X) et S(Y) et d'un ampèremètre pour mesurer le courant entre les piquets de terre E(X) et H(Z).

On fait circuler un courant  $I(t)$ , et on mesure la tension aux bornes de  $R_x$  et  $R_s$ .

Conformément à la loi d'Ohm, on calcule R à l'aide de la formule suivante :

$$R_x = \frac{u_x}{I} \tag{VI.9}$$

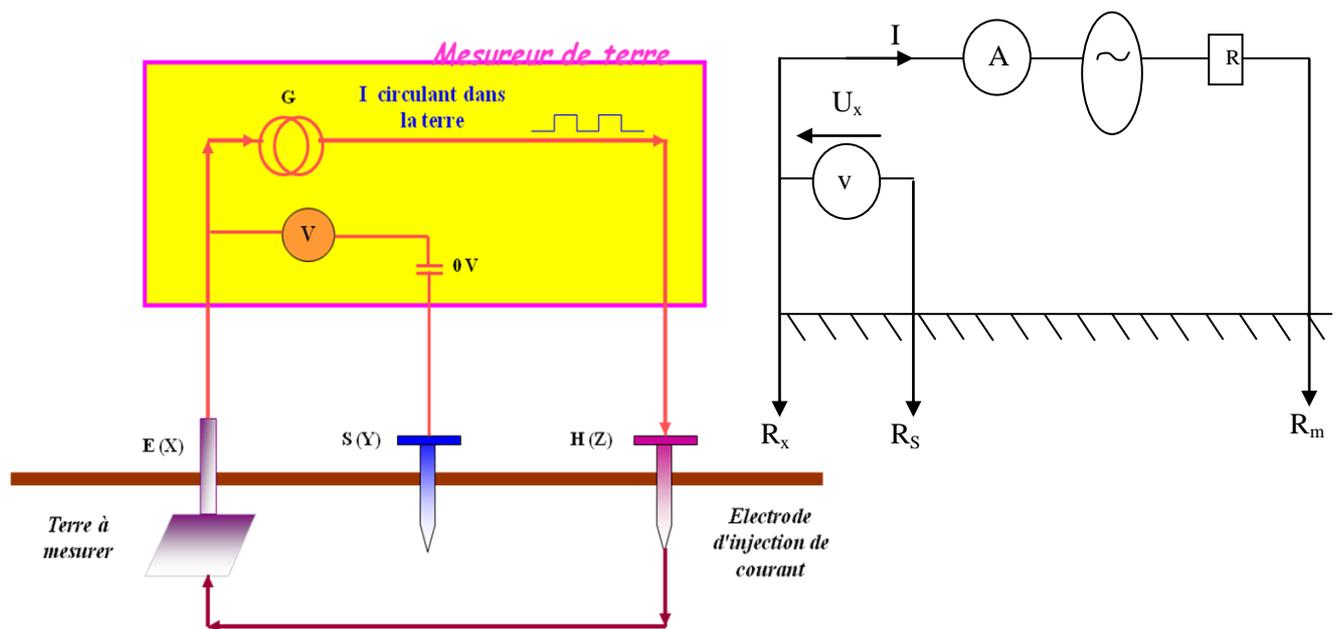


Figure VI. 3 : Principe de mesure de la résistance de terre à 3 pôles

Pour obtenir le maximum de précision avec la méthode de mesure à 3 pôles, il faut impérativement placer la sonde de tension (S) à l'écart de la zone d'influence des prises de terre et des prises auxiliaires sur lesquelles porte la mesure.

### VI.5.2. Méthode de mesure à 4 pôles (méthode "de Wenner")

On dispose les 4 sondes en ligne, en les espaçant de manière équidistante, selon un intervalle qui dépend de la profondeur à tester. Les sondes ne doivent pas être enfoncées de plus de 1/3 de la distance qui les sépare. L'appareil de mesure de la résistance de terre (ex : Le **SATURN GEO**, l'**UNILAP GEO** ou l'**UNILAP GEOX**) injecte un courant constant entre les deux piquets extrêmes et mesure, entre les deux piquets intérieurs, la chute de potentiel due à la résistance de terre. L'appareil affiche ensuite la résistance en ohms.

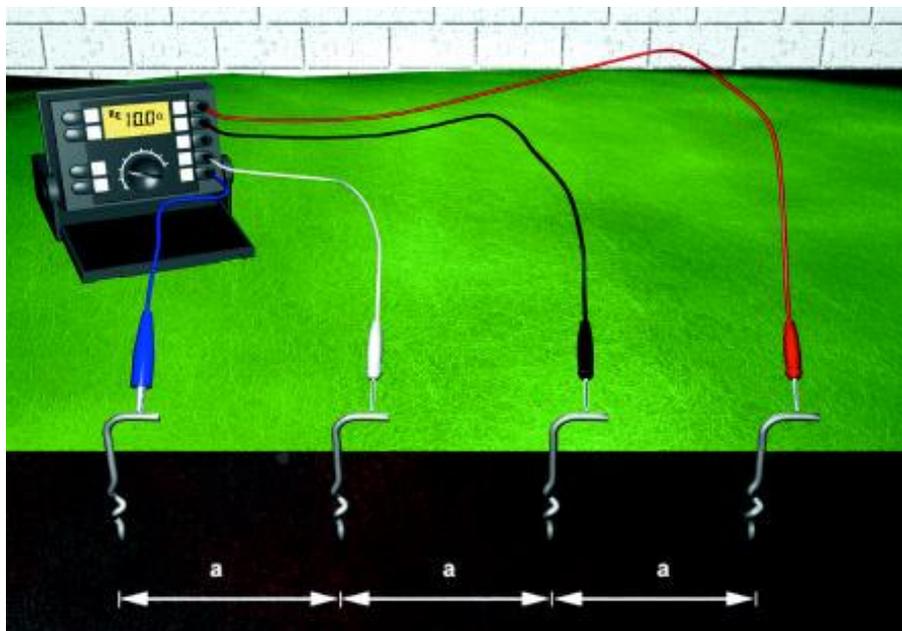


Figure VI. 4 : Principe de mesure de la résistance de terre –méthode de Wenner

La résistivité du sol est donnée par la formule suivante:

$$\rho = 2 \pi A R \quad (\text{VI.10})$$

où:  $\rho$  = résistivité en  $\Omega\text{m}$

A = distance entre les sondes en m

R = résistance affichée sur l'appareil de mesure de terre

**Exemple :** pour le système de mise à la terre, on utilise des prises de terre pénétrant à 3 m de profondeur. Pour déterminer la résistivité du sol à une profondeur de 3 m, il faut placer les 4 sondes à une distance de 4 m les unes des autres. Ainsi la profondeur correspondante à la valeur de résistivité mesurée est égale 3/4 de A soit 3 mètres (= 3/4 x 4) de profondeur pour cet exemple.

Il faut que les 4 sondes pénètrent dans le sol à une profondeur égale à  $A/20$  (0,15 m).

Lorsque l'affichage atteint  $100\Omega$  (par exemple), la résistivité d'un mètre cube de terre est la suivante  $\rho = 2 \times 3,14 \times 3 \times 100$ ,  $\rho = 1885 \Omega\text{m}$ .

### VI.5.3. Mesures sélectives par pince ampèremétrique

Cette méthode permet de mesurer la résistance des prises de terre individuelles sur des systèmes complexes comportant des systèmes maillés ou de réseaux de grilles tels que ceux qui sont utilisés pour les postes de distribution publique, pour les pylônes des lignes à haute tension comportant des câbles de garde et pour les installations industrielles à terres multiples.

En utilisant une pince ampèremétrique spécialement conçue pour mesurer le courant qui traverse une prise de terre individuelle, on parvient à éliminer l'influence des prises de terre parallèles. Un procédé spécial d'analyse qui utilise un filtrage numérique des perturbations permet d'obtenir une précision extrême.

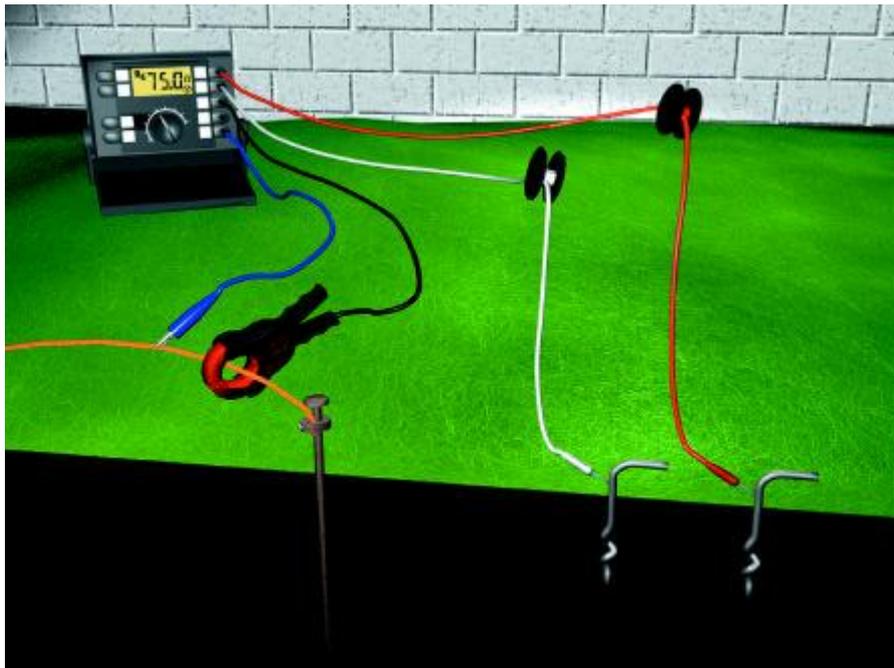


Figure VI. 5 : Principe de mesure de la résistance de terre avec la pince ampèremétrique

#### ■ Mesures sélectives sur pylônes haute tension

Pour pouvoir mesurer avec précision la résistance de terre individuelle au niveau de chaque pied de pylône haute tension comportant un câble de garde, il faut retirer ce dernier. Si la base du pylône comporte plusieurs prises de terre, il faut également les isoler pour les mesurer.

Pour mesurer la résistance de terre de chaque pied du pylône sans avoir à déconnecter le câble de

garde ni les connexions à la terre, il faut utiliser un appareil de mesure de résistance de terre équipé d'un transformateur torique (angle d'ouverture max. 310 mm) (e x: L'UNILAP GEOX ).

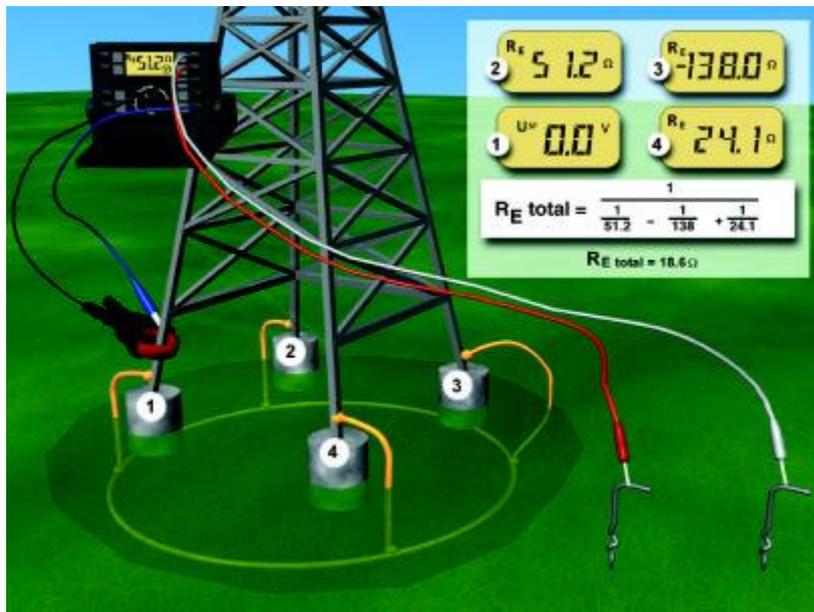


Figure VI. 6 : Mesure de la résistance de terre avec la pince ampèremétrique sur pylônes haute tension

La résistance de terre effective globale du pylône résulte du montage en parallèle de toutes les prises de terre. Il faut mesurer chacune des quatre résistances de terre partielles pour pouvoir calculer la résistance qui en résulte, en appliquant la formule des résistances parallèle comme montré sur le schéma de la figure (VI.6) ci-dessus.

#### VI.5.4. Mesures sans piquet de terre

Les différentes résistances de terre des installations de mise à la terre complexes sont mesurées à l'aide de 2 pinces ampèremétriques. Pour cette mesure, il faut utiliser des appareils de mesure de résistance de terre équipé d'un transformateur torique (angle d'ouverture max. 310 mm) (e x: L'UNILAP GEOX). Avec ce système, il n'y a plus besoin de déconnecter les prises de terre parallèles, ce qui est dangereux et fastidieux, ni de rechercher la meilleure position pour les sondes.

##### Comment ça marche ?

La méthode est basée sur le fait que dans les installations disposant de prises de terre multiples, la résistance de terre effective globale est nettement inférieure à la résistance de terre individuelle qu'il faut mesurer.

La résistance qui résulte du montage parallèle des résistances R1...Rn est très faible. Dans la pratique, l'erreur de mesure de Rx est donc négligeable.

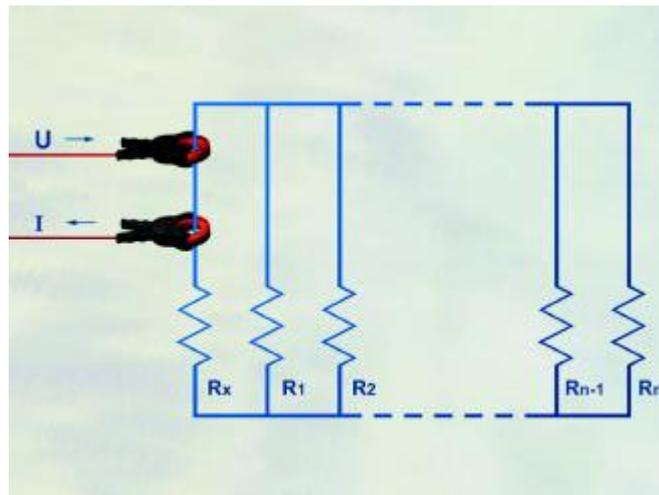


Figure VI. 7 : Mesure de la résistance de terre sans piquet de terre

La première pince ampèremétrique injecte une tension, tandis que la deuxième pince mesure le courant qui passe effectivement. Cela permet à l'appareil de mesure de résistance (ex : l'**UNILAP GEOX**) de mesurer la tension et le courant avec redressement synchrone et de calculer la résistance  $R_x$ .

Les mesures par pincettes ampèremétriques ne s'appliquent qu'aux prises de terres qui sont montées en parallèle sur des installations complexes. Lorsque le reste du système de mise à la terre n'est pas directement en parallèle de prise de terre mesurée, la mesure est impossible (pas de bouclage du courant) ou bien on obtient la résistance de l'ensemble du circuit de retour par la terre.

#### VI.5.5. Méthode de mesure à 2 pôles

Il y a des situations où il est difficile, voire impossible de placer les piquets de terre. Certains appareils de mesure de la résistance de la terre (tels que **L'HANDY GEO**, le **SATURN GEO**, l'**UNILAP GEO** ou l'**UNILAP GEOX**) permettent alors d'effectuer une mesure bipolaire de la résistance ou de la boucle. Pour cela, il faut utiliser une prise de terre de basse impédance, comme une conduite d'eau, par ex. Les tubes de métal doivent être espacés et ne doivent pas comporter de raccords isolants.



Figure VI. 8 : Principe de mesure de la résistance de terre avec 2 pôles

- 1) Industrial high voltage, coordinating- measuring- testing, F.H. KREUGER
- 2) Industrial high voltage, Electric field- dielectric- construction, F.H. KREUGER
- 3) Haute tension, M. AGUEI et M. IANOZ
- 4) Accelerated testing- statistical models- test plans and data analyses, W.NELSON
- 5) An introduction to high voltage experimental technique, D. KIND
- 6) High voltage engineering, E. KUFFEL, W.S. ZAENGL et J.KUFFEL
- 7) High voltage insulation technology, KIND et KAMER
- 8) Techniques de la Haute Tension, Djilali Benyoucef
- 9) Haute tension, AFFOLTER Jean-François
- 10) Les essais de rigidite et d'isolement, EFELEC les tests dielectriques
- 11) Diélectriques, Bases théoriques, Robert FOURNIÉ et Roland COELHO
- 12) Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides, Claude MENGUY, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 2 310
- 13) High-Voltage Test and Measuring Techniques, Wolfgang Hauschild et Eberhard Lemke
- 14) Mesures de mise à la terre, LEM Instruments, A-2351 Wiener Neudorf