

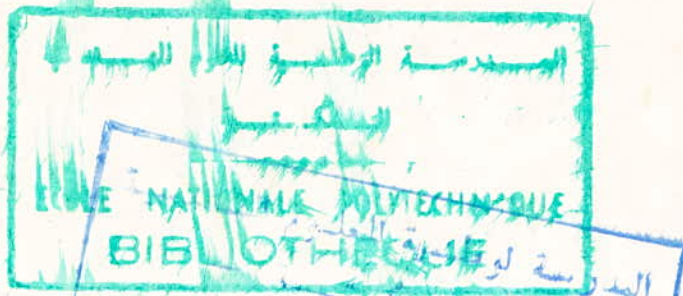
4/77

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

202



THESE DE FIN D'ETUDES



LABORATOIRE D'ESSAI DE LA
CAPACITE ET DU FACTEUR
DE PERTES



Proposée par

M. DOBARDZIC

Etudiée par

A. BENOUDJIT

PROMOTION 1977

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

THESE DE FIN D'ETUDES

LABORATOIRE D'ESSAI DE LA
CAPACITE ET DU FACTEUR
DE PERTES

Proposée par

M. DOBARDZIC

Etudiée par

A. BENOUDJIT

PROMOTION 1977

A M E S P A R E N T S .

A M E S A M I S .

-o- R E M E R C I E M E N T -o-

=====

J'exprime ma vive gratitude envers tous les professeurs qui ont contribué à ma formation et particulièrement Monsieur D O B A R Z I G pour avoir dirigé cette thèse, pour ses précieux conseils et pour son appui constant.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette étude, et particulièrement Soraya, Saïd et Smaïn.

A. B E N O U D J I T.

- S O M M A I R E -
- - - o o o - - -

- I N T R O D U C T I O N .

C H A P I T R E - I

P E R T E S D ' E N E R G I E D A N S L E S D I E L E C T R I Q U E S .

1.1	Généralités	1.1
1.2	Quelques applications des diélectriques dans la T.H.T....	1.1
1.3	Paramètres caractérisant un diélectrique	1.3
1.4	Représentation schématique des diélectriques.....	1.4
1.5	Origine des pertes dans les diélectriques.....	1.7
1.6	Facteurs influençants les pertes.....	1.9

C H A P I T R E - II

L E S M E T H O D E S D E M E S U R E D E tg^{δ} E T C_X .

2.1	Généralités.....	2.1
2.2	Principales méthodes pour la détermination de tg et C_X ...	2.1
	a) Méthodes de zéro (ou méthodes de pont).	
	b) Méthodes de résonance.	
2.3	Les dispositifs de mesure et leur principe.....	2.3
	1. Pont de Schéring	
	2. Pont à transformateur	
	3. Pont en double " T "	
	4. Méthodes de résonance (acuímétre)	
	5. Méthodes de variation de la susceptance , (ou de la réactance).	

(Suite)

C H A P I T R E _ _ I I I _ _

LABORATOIRE D'ESSAIS POUR LES MESURES DE $tg \delta$ ET C_X .

3.1	Généralités.....	3.1
3.2	Mesure de $tg \delta$ à l'aide du Pont de Schéring.....	3.3
3.3	Condensateurs étalons.....	3.9
3.4	Source de tension habituelle.....	3.12
3.5	Liaisons d'alimentation et de mesure.....	3.15

C H A P I T R E _ _ I V _ _

MESURE DE $tg \delta$ ET C_X AVEC LE PONT DE L'E.N.P.A.

4.1	Généralités.....	4.1
4.2	Station d'essai de $tg \delta$ et C_X de l'E.N.P.A.....	4.1
4.3	Modèle à essayer.....	4.7
	a) Transformateur de mesure	
	b) Plaque d'isolant en plexiglass	
4.4	Mesures non faites.....	4.15

- C O N C L U S I O N S .

- B I B L I O G R A P H I E .

- - - - - o o o - - - - -

- I N T R O D U C T I O N -

Les recherches sur les pertes des matériaux isolants utilisés dans la technique des hautes tensions ont acquis de plus en plus d'importance, car elles caractérisent leurs propriétés électriques et leur état chimique et physique.

Dans notre pays, le développement industriel accentué entraîne des progrès rapides de la production de l'énergie électrique et cela à des niveaux de tensions de plus en plus élevés. De ce fait l'étude du comportement des matériaux isolants et des isolations qui jusqu'à l'heure actuelle n'est que partiellement abordée, occupera une place plus importante dans le programme de recherches des sociétés nationales spécialisées, comme p.ex. celles fabriquant les isolations et l'appareillage électrique.

On sait que dans une isolation soumise à un champ alternatif, sont créés des pertes d'énergie que l'on caractérise par l'angle de pertes ou bien par $\text{tg } \delta$.

Plusieurs auteurs ont entrepris dans ce domaine des recherches théoriques et expérimentales, parmi eux le professeur H. SCHERING, qui a conçu le premier pont de mesure à haute tension pour la détermination du facteur de dissipation $\text{tg } \delta$ et de la capacité C_x .

La présente thèse consiste d'une part à la caractérisation des pertes d'énergie dans les diélectriques, par le facteur $\text{tg } \delta$ et d'autre part à la détermination de ce paramètre pour divers modèles à l'aide du pont de Schering.

La thèse est divisée en quatre chapitres.

Dans le premier est donné un bref aperçu sur les diélectriques utilisés dans la technique des hautes tensions, leur représentation schématique ainsi que l'origine des pertes et les divers facteurs qui les influencent.

Au second chapitre sont présentées les différentes méthodes recommandées pour la détermination du facteur $\text{tg}\delta$ et de la capacité C_X en se basant sur les normes.

Les deux derniers chapitres concernent les mesures de $\text{tg}\delta$ et C_X dans un laboratoire général et spécialement dans celui de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

Certaines mesures n'ont pu être faites à cause du manque de certains équipements (condensateurs étalons, cellules de mesure, appareils donnant des conditions d'ambiance variées...).

Pour cela nous espérons qu'il sera donné une plus grande importance à ce laboratoire, car mis à part une orientation didactique pour les étudiants, il pourra servir pour les recherches expérimentales, sur les matières isolantes en collaboration avec des sociétés spécialisées dans ce domaine.

CHAPITRE I

PERTES D'ENERGIE DANS LES DIELECTRIQUES

1.1 GENERALITES

Les isolations soumises à un champ alternatif donnent naissance à des pertes diélectriques que l'on caractérise par le facteur $\text{tg } \delta$. Ces pertes varient dans de très grandes proportions d'un isolant à l'autre et elles sont en général une fonction rapidement croissante de la température et de la tension à partir de certaines valeurs.

Pour étudier ces différents phénomènes nous allons tout d'abord rappeler quelques applications des diélectriques dans la technique des hautes tensions. En suite on définira les principaux paramètres caractérisant les diélectriques ainsi que la représentation schématique de ces derniers. Et on terminera par rappeler l'origine des pertes ainsi que les divers facteurs qui les influencent .

1.2 QUELQUES APPLICATIONS DES DIELECTRIQUES DANS LA TECHNIQUE DES HAUTES TENSIONS.

L'isolement électrique et les diélectriques ont un rôle très important dans les installations à haute tension, car toute panne dans ces unités lourdes coûte très cher et affecte la distribution de l'énergie.

Dans ce qui suit nous allons présenter brièvement les isolants employés dans l'équipement le plus important de ces installations

- Les transformateurs de puissance et de mesure, généralement soumis à toutes formes de surtension (de foudre, de manoeuvre...), doivent supporter sans dommages ses contraintes.

Pour cela les diélectriques rentrant dans cette application doivent avoir de bonnes propriétés diélectriques, mécaniques, chimiques et thermiques .

Les matériaux isolants les plus employés sont le papier imprégné , le presspahn, l'huile de pétrole , la porcelaine et les vernis.

- Les appareils de coupure , englobent tous les systèmes de connection et d'interruption , associés au contrôle des circuits électriques.

Dans ces appareils on emploie des matériaux diélectriques tels que les composés de résines phénoliques , du papier imprégné à l'huile , des céramiques spéciales air comprimé , de l'hexafluorure de soufre , des huiles de pétrole et de la fibre vulcanisée . Ces deux derniers isolants aident à éteindre l'arc grâce aux gaz qu'ils produisent .

- Les machines tournantes , emploient aussi des matériaux isolants dont la rigidité diélectrique est élevée et ayant de bonnes propriétés mécaniques et thermiques .

Dans leur construction on emploie du mica , du presspahn , des gaines isolantes en matières synthétiques , de la bakélite et des vernis .

- Les câbles , devant travailler dans différents milieux sous terre , sur mer et dans l'air , utilisent une grande variété de diélectriques , dont les principaux sont le caoutchouc naturel , le caoutchouc de silicones , le polyéthylène , le nylon , le chlorure de polyvinyle , le téflon , le néoprène ainsi que les huiles et certains composés gazeux .

1 . 3 PARAMETRES CARACTERISANT UN DIELECTRIQUE

Tous les diélectriques (solides , liquides , gazeux) , mises à part les caractéristiques thermiques et mécaniques peuvent être caractérisés par les trois principaux paramètres électriques suivants :

- l'angle de pertes (c.a.d. $\text{tg } \delta$) .
- la permittivité relative ϵ_r .
- la rigidité diélectrique E_d .

On trouve les définitions des deux premiers paramètres dans les normes - U.T.E [1] ; nous les citons :

" L'angle de pertes diélectriques δ d'un isolant est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui on

resulte lorsque le diélectrique du condensateur se compose exclusivement du matériau isolant . "

" Le facteur de dissipation $\tan \delta$, d'un isolant est la tangente de l'angle de pertes δ . "

" La permittivité relative ϵ_r (ou constante diélectrique relative) d'un isolant est le rapport de la capacité C_x d'un condensateur , dans lequel l'espace entre les électrodes et autour d'elles est entièrement et exclusive - ment rempli de l'isolant en question , à la capacité C_0 de la même disposition d'électrodes dans le vide :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} . "$$

(Nous rappelons que la permittivité de l'air sec est très voisine de ϵ_0 et que pour cette raison on pourra prendre normalement la capacité C_a du dispositif d'électrodes dans l'air au lieu de C_0 pour déterminer la permittivité relative avec une précision suffisante) .

Nous définirons la rigidité diélectrique [3] , comme la valeur maximale de l'intensité du champ au dessus de laquelle le diélectrique perd ses propriétés isolantes .

1.4 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIELECTRIQUES .

Les pertes d'énergie sont mises en évidence par la représentation schématique des diélectriques . Pour qu'on puisse les schématiser considérons les deux cas : Un condensateur sans pertes (dont on prend comme diélectrique l'air ou le vide) puis un condensateur avec diélectrique présentant des pertes et soumis à une tension sinusoïdale :

$$u = \sqrt{2} . U . \sin \omega t \quad (1.1)$$

Dans le premier cas à chaque instant la charge électrique dQ cumulée dans le condensateur est :

$$dQ = C_0 . du \quad (1.2)$$

Sous une telle tension ce condensateur est traversé par un courant de charge

$$i_{co} = \frac{dQ}{dt} = Co \cdot \frac{d u}{dt} \quad (1.3)$$

$$i_{co} = \sqrt{2} \cdot U \cdot Co \cdot w \cdot \cos wt \quad (1.4)$$

Comme on le constate ce courant de charge est déphasé en avance sur la tension d'un angle $\varphi = 90^\circ$, donnant ainsi un angle de pertes $\delta = 0$.

la représentation vectorielle (courant , tension) du condensateur sans pertes est donnée par la fig 1.a .

Dans le deuxième cas (condensateur sans pertes) le courant traversant le condensateur peut être décomposé en un courant de charge i_c et un courant i_a , qu'on appelle courant de conduction dû à la resistance R de fuite du diélectrique , qui est :

$$i_a = \frac{u}{R} = \sqrt{2} \frac{U}{R} \cdot \sin wt \quad (1.5)$$

est en phase avec la tension .

Donc le courant total à chaque instant est :

$$i_t = i_a + i_c$$

il est déphasé en avance sur la tension d'un angle $\varphi < 90^\circ$, donnant ainsi un angle de pertes $\delta = 90 - \varphi$, fig 1.b .

Ce condensateur avec pertes peut être schématisé par un couplage de R_1 et C_1 en parallèle fig 2.b , ou bien par un couplage en serie de R_1' et C_1' fig 2c.

A ces couplages correspond les diagrammes vectoriels des fig 1b et 1c .

La représentation en parallèle d'un condensateur (ou d'un isolant) ayant des pertes diélectriques , est la plus employée car elle donne une meilleure interprétation , mettant en évidence le courant de conduction i_a entraînant les pertes .

l'angle de pertes δ (ou angle de retard) du courant total sur le courant capacitatif est défini pour le couplage de R, C en parallèle :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{R_1 C_1 w} \quad (1.6)$$

et par :
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_a}{U_c} = R'_1 \cdot C'_1 \omega \quad (1.7)$$

dans la représentation serie .

La puissance du condensateur , transformée en chaleur est :

$$P = U \cdot I_a = U \cdot I \sin \delta = U \cdot I \cos \varphi \quad (1.8)$$

Pour tous les diélectriques utilisés dans la technique des hautes tensions , l'angle de pertes δ est très petit (Voir tableau 1) et on peut écrire :

$$\sin \delta \approx \operatorname{tg} \delta \approx \delta \quad (1.9)$$

et
$$P = U I \sin \delta \approx U \cdot I \operatorname{tg} \delta \quad (1.10)$$

Tableau 1 . facteur $\operatorname{tg} \delta$ pour quelques diélectriques , [4].

$\operatorname{tg} \delta$	0,0002 à 0,0015	0,006	0,02 à 0,06	0,001	0,02
Isolant	Mica	Papier pour Câbles	Porcelaine	Huile de transfo	Câbles

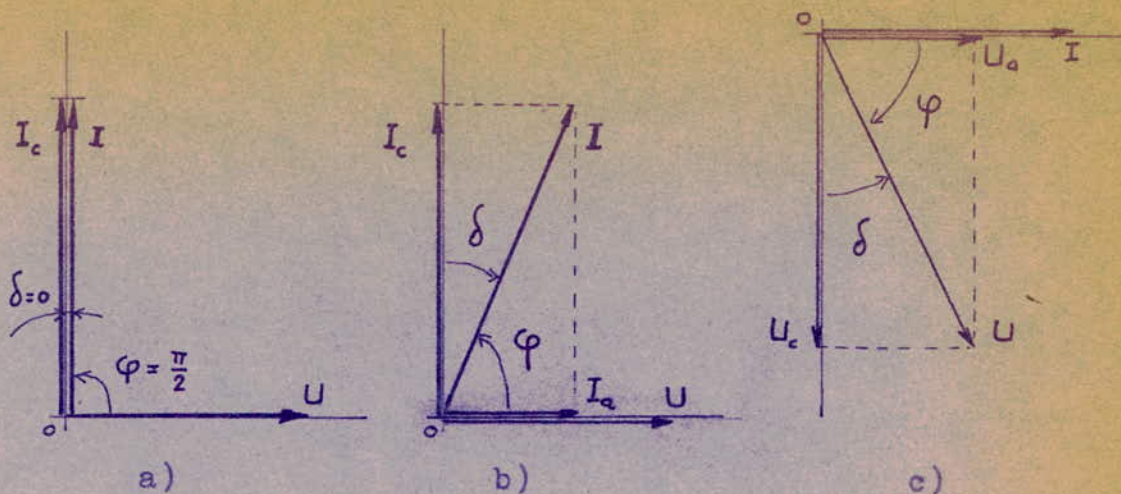


Fig. 1

Représentation vectorielle du courant et de la tension, donnant l'angle de pertes δ pour un condensateur :

- a) sans pertes .
- b) avec pertes, dans la représentation parallèle.
- c) ----- série .

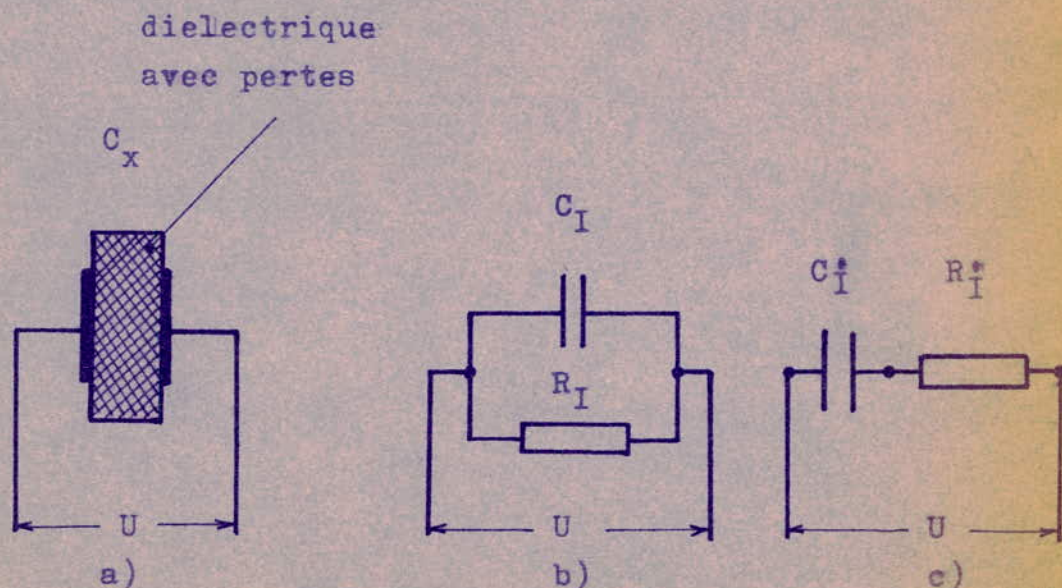


Fig. 2

Représentation d'un condensateur C_x avec pertes, par des schémas équivalents (R,C), parallèle ou série.

1.5 . ORIGINES DES PERTES DANS LES DIELECTRIQUES

L'énergie dépensée est traduite par le facteur de pertes $\text{tg } \delta$, ne comprend pas uniquement l'énergie dissipée par le courant de conduction que nous venons de voir dans le paragraphe précédent .

En effet d'autres mécanismes dissipatif sont à l'origine de ces pertes à savoir le phénomène dipolaire des molécules et le phénomène de polarisation interfaciale .

Avant de parler de ces pertes nous rappelons tout d'abord la classification des matériaux isolants d'après l'évolution du facteur de pertes $\text{tg } \delta$ en fonction de la température et de la fréquence .

Ces matériaux sont classés en deux groupes .

- l'un comprenant les matériaux polaires
- l'autre les matériaux apolaires (non polaires) .

Cette subdivision est reliée à la présence ou à l'absence dans la molécule polyatomique , d'une dissymétrie d'ordre électrique . Suivant l'importance de cette dissymétrie , le caractère polaire du matériau sera plus ou moins marqué .

- les matériaux apolaires sont caractérisés par un facteur de dissipation faible et variant très peu en fonction de la température et de la fréquence .

- les matériaux polaires doivent leur comportement à la présence de dipôles permanents dans leur constitution moléculaire . Ces matériaux présentent en fonction de la fréquence ou de la température , une ou plusieurs bandes d'absorption dipolaire caractérisées , par le passage du facteur $\text{tg } \delta$, par une valeur maximale .

En règle générale , le facteur $\text{tg } \delta$ de ces matériaux est plus élevé à basse fréquence et notamment à fréquence industrielle , que ceux des matériaux non polaires .

A ces pertes diélectriques d'origine dipolaire que nous venons de voir , viennent se superposer les pertes liées à la polarisation interfaciale .

Ces pertes sont souvent qualifiées de pertes Maxwell-wagner , elles sont généralement liées à la concentration de charges libres peu mobiles au voisinage des conducteurs ou bien à la surface de séparation de deux matériaux diélectriques .

Comme on le constate l'origine des pertes n'est pas uniquement dû au phénomène de conduction , mais aussi au caractère polaire des matériaux et à leur polarisation interfaciale .

Donc le facteur $\text{tg } \delta$ mis en évidence par la représentation schématique caractérise d'une manière générale l'ensemble des pertes dans les diélectriques .

1.6. FACTEURS INFLUENCANTS LES PERTES.

La contribution relative des divers mécanisme dissipatifs , que nous venons de voir dans le paragraphe précédent , dépend de nombreux facteurs liées aux conditions d'essai et qui peuvent influencer le facteur de pertes $\text{tg } \delta$ des isolations , il s'agit en particulier de la tension appliquée , de la fréquence d'essai , de la température et de la nature des constituants de l'isolation (eau , poussière , etc ...) .

Dans ce qui suit nous allons rappeler ces divers influences .

- Influence de la tension appliquée est représentée par la courbe dans la fig 3.c . On voit que cette caractéristique change brusquement son allure pour une certaine valeur de la tension U_i correspondant à un "seuil critique d'ionisation " et à partir de cette valeur $\text{tg } \delta$ augmente rapidement . C'est à ce niveau que le diélectrique commence à s'ioniser et la cause de cette ionisation est due à un accroissement des charges électriques cas des décharges partielles transportées d'une électrode à l'autre à travers l'isolation considérée , traduisant l'augmentation du courant de conduction et du facteur de pertes $\text{tg } \delta$,

Pour les tensions inférieures à U_i les pertes sont constantes , par contre elles augmentent rapidement avec la tension pour des valeurs supérieures à U_i .

La Fig. 3 b illustre les variations de $\text{tg } \delta$ en fonction de la tension et cela à différentes températures pour les huiles minérales . [5] .

- Influence de la fréquence .

Pour la plupart des diélectriques polaires les variations du facteur de dissipation $\text{tg } \delta$ en fonction de la fréquence sont données par la fig. 4.a . On remarque que les pertes diélectriques sont assez importantes dans l'intervalle (f_1 ; f_2) et maximales pour f_0 .

En effet ces variations sont produites par la polarisation diélectrique et la conductibilité . Les variations les plus importantes résultent de la polarisation dipolaire , qui est due quand à elle aux molécules polaires et à la polarisation interfaciale résultant de la non homogénéité des matériaux .

Alors il est préférable d'utiliser les diélectriques pour des fréquences extérieures à l'intervalle (f_1 ; f_2) , correspondant à des pertes minimales .

Par ailleurs il existe certains matériaux tels que , le polyéthylène , le polystyrène ou les céramiques qui ont un facteur $\text{tg } \delta$ presque constant sur une plage étendue de fréquence , Fig 4 b et 4 c , [5] . En générale ces matériaux sont constitués par des molécules symétriques en présentant une certaine homogénéité .

- Influence de la température

La caractéristique $\text{tg } \delta$ en fonction de la température est représentée par la courbe dans la Fig 3.a . Les pertes restent sensiblement constantes jusqu'à une certaine température (t_c) , appelée température critique , au delà de cette valeur les pertes augmentent très rapidement .

En effet l'augmentation de la température d'un diélectriques , donne une plus grande mobilité pour les ions , traduisant ainsi l'accroissement du courant de conduction I_a , et par la même du facteur $\text{tg } \delta$.

Pour mettre en évidence cette influence on peut se servir des Fig 3 b , 4 b et 4 c , [5] .

- Autres facteurs influençant les pertes

Le facteur de dissipation $\text{tg } \delta$ est influencé par d'autres paramètres non négligeables tels que le degré d'humidité et l'influence du milieu sur les diélectriques .

- Influence de l'humidité .

Les huiles et les gaz contiennent des fibrilles et des traces d'humidité (molécules d'eau) ; ces impuretés se répartissent entre le système formant les électrodes , sous l'action du champ électrique .

Ces impuretés forment une espèce de chaîne conductrice , donnant une diminution de la rigidité diélectrique , traduisant ainsi l'augmentation du courant de conduction I_a et du facteur $\text{tg } \delta$.

- Influence du milieu extérieur sur les diélectriques :

Dans les transformateurs , disjoncteurs , isolateurs , câbles , les diélectriques et en particulier les liquides , viennent en contact avec des matériaux aussi différents que le cuivre , le plomb et ses alliages , l'aluminium , l'acier , en ajoutant à cette liste les différents constituants de l'atmosphère; il est évident qu'on ne peut négliger l'influence du milieu dans l'étude du comportement des diélectriques ; car cela entraîne la contamination de ces derniers , et donnant ainsi des modifications de leurs propriétés physiques , chimiques et diélectriques .

Tous les phénomènes décrits ci dessous ont des effets néfastes , tel qu'une usure ou un vieillissement prématuré , entraînant ainsi les défaillances des isolations .

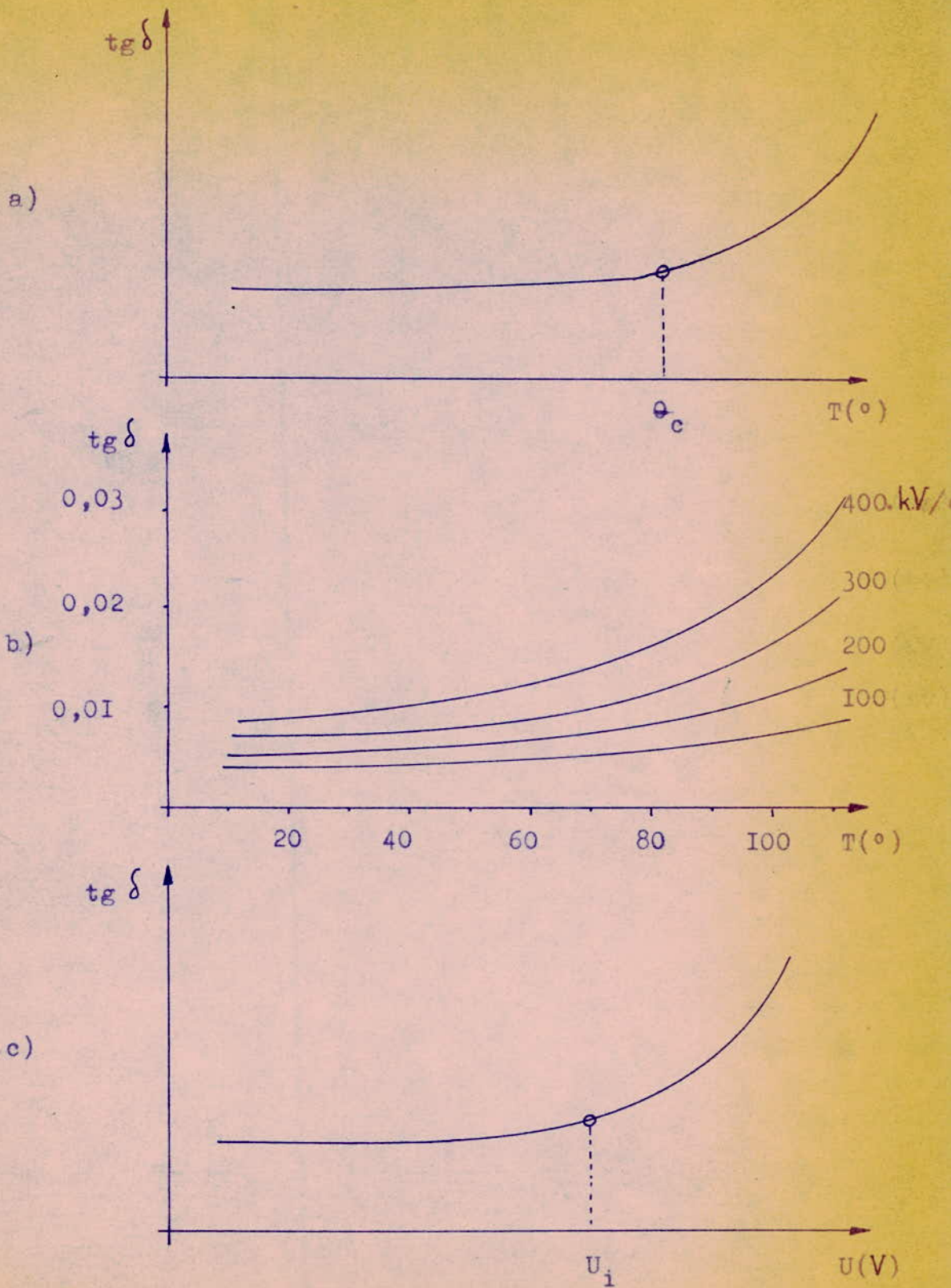


Fig. 3

Graphes des variations de " $\text{tg } \delta$ " en fonction de la température et de la tension.

a) et c) pour les diélectriques en général.

b) . . . pour les huiles minérales. [5]

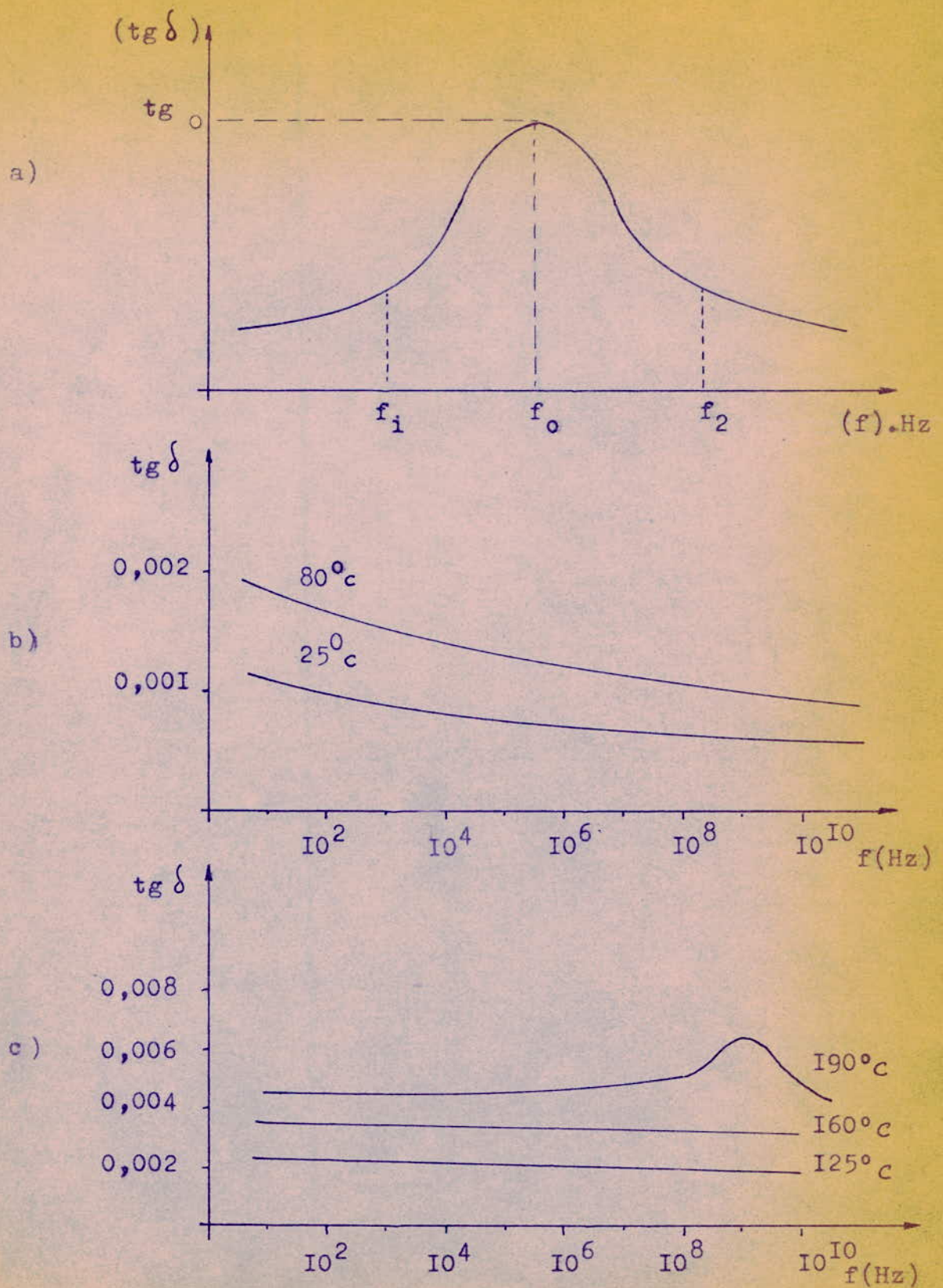


Fig. 4

Graphes des variations de " $\text{tg } \delta$ " en fonction de la fréquence et de la température.

a) pour les dielectrique liquide, b) les céramiques [5],

c) le polyethylene. [5].

C H A P I T R E II

METHODES DE MESURE DU FACTEUR $tg \delta$ ET DE LA CAPACITE C_x

2.1. GENERALITES

En se basant sur les normes de l'U.T.E [1] et les recommandations de la C.E.I [2] , nous rappellerons dans le présent chapitre les principales méthodes de mesure du facteur de dissipation $tg \delta$ et de la capacité C_x et nous donnerons un bref aperçu sur les dispositifs utilisés .

2.2 PRINCIPALES METHODES POUR LA DETERMINATION DE $tg \delta$ ET C_x .

On ne mesure directement ni le facteur $tg \delta$, ni la capacité C_x , mais on les obtient par calcul ou bien par une méthode de substitution .

Les méthodes utilisés peuvent être classées en trois principales familles :

- a) Les méthodes de zéro (ou méthodes de pont) utilisées dans la gamme des basses et moyennes fréquences .
- b) Les méthodes de résonance , utilisées pour les hautes fréquences .
- c) Les méthodes de phase et d'atténuation utilisables dans toute la gamme de fréquence , mais en général avec une précision plus faible que pour les deux précédentes .

Une quatrième classe est basée sur la mesure de la tension et du courant (méthode voltampéremétrique) . Cette méthode est très rarement utilisées car sa précision est très faible .

Les méthodes de zéro et de résonance sont largement utilisées et elles feront l'objet de l'étude de ce chapitre .

- a) Les méthodes de zéro (ou méthodes de pont) .

Ces méthodes utilisent des circuits en T ou des ponts à capacités à bras résistifs ou inductifs ^L . L'équilibrage de ces ponts est obtenue par le réglage de l'*impédance* dans l'une de ces branches .

L'équilibrage de ces branches , dans ce cas le facteur $tg \delta$ et la capacité C_x sont déterminés par les données connues du pont à l'équilibre (résistances et capacités) .

Ces méthodes sont utilisées pour des fréquences de mesure allant de 1 Hz à 40- ou 50 M Hz . En effet , on est limité vers les basses fréquences du fait que l'équilibrage des ponts devient de plus en plus délicat , et vers les hautes fréquences par les impédances parasites des connexions reliant l'échantillon C_x et le condensateur étalon C_n aux bras du pont .

Les ponts les plus utilisés sont les suivants :

- Le pont de Schéring , représenté schématiquement sur la fig 5a .
- Le pont à transformateur (fig. 5 b) .
- Le pont en double T (fig. 5 c) .

La description et le principe de **chacon** de ces ponts seront donnés dans le paragraphe suivant ; (2.3) .

b) Les méthodes de résonance .

Elles prennent le relais des méthodes du zéro , car celles-ci introduisent aux plus hautes fréquences , des erreurs importantes (dues aux impédances parasites des connexions) .

Ces méthodes ont en commun , le principe d'être basées sur la résonance d'un circuit (L,C) dans lequel la capacité est constituée , au moins pour une part le diélectrique en question.

La Capacité C_x de l'échantillon est obtenue par une méthode de substitution et le facteur $tg \delta$ par la mesure de la largeur de la courbe de résonance .

Ces méthodes sont employées pour des fréquences allant de 10 K Hz à plusieurs centaines de M Hz , et les plus utilisées sont les suivantes :

- Méthode de résonance (à **cuimètre**) .
- Méthode de variation de la susceptance (ou méthode de variation de la réactance) .

2.3 LES DISPOSITIFS DE MESURE ET LEURS PRINCIPES

Dans ce qui suit nous allons donner la description et le principe de base des dispositifs utilisés pour la détermination du facteur de pertes $tg \delta$ et de la capacité C_x .

1. PONT DE SCHERING .

Ce pont est le dispositif le plus classique pour la mesure de la capacité C_x et du facteur $\text{tg } \delta$. Il est employé dans une large bande de fréquence allant de 1 Hz jusqu'à 100 K Hz . et pour des capacités variant de 0,05 μF à 1 μF . Ces valeurs sont les capacités usuelles des échantillons ou des équipements essayés) ;

Le pont est constitué par quatre branches , dont les deux supérieures sont essentiellement capacitives (C_x - capacité de l'échantillon , C_n - capacité du condensateur étalon) et les deux branches inférieures (souvent dites de mesure) , composées d'une branche de résistance R_3 et d'une branche de résistance R_4 sur laquelle est shunté le condensateur C_4 .

Si on adopte la représentation équivalente série pour l'échantillon en question l'équilibre du pont est obtenu à l'aide de R_4 et C_4 qui sont variables , et cela nous conduit aux relations suivantes :

$$C_x = C_n \cdot \frac{R_4}{R_3} . \quad (2.1)$$

$$\text{tg } \delta_x = \omega \cdot C_x \cdot R_x = \omega \cdot C_4 \cdot R_4 . \quad (2.2)$$

et dans le cas où la résistance R_3 est shuntée par C_3 L'expression de $\text{tg } \delta$ devient :

$$\text{tg } \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4 - \omega \cdot R_3 \cdot C_3 . \quad (2.3)$$

La réalisation des ponts de mesure diffère sensiblement , selon la gamme de fréquence , et cela provient du fait qu'une capacité de 0,05 μF à 1 μF représente une impédance de 60 M Ω , à 3 M Ω (à 50 Hz) et seulement 30 K Ω à 1,5 K Ω (à 100 K Hz) ; Alors on est conduit à distinguer deux types d'utilisation à basse ou à haute fréquence .

Pont à basse fréquence

C'est un pont à haute tension du fait qu'aux basses fréquences (50 à 60 Hz) les pertes diélectriques intéressent spécialement la technique des hautes tensions.

La grande différence entre les valeurs des impédances des branches supérieures (capacitves) et inférieures (de mesure) précitées , entraîne une inégalité du même ordre pour la tension , c'est à dire que la presque totalité de celle-ci se retrouve sur Cx et Cn .

Les conditions d'équilibre données ci-dessus , ne sont valables que si les éléments basse tension (des branches de mesure à savoir , le pont , le shunt , le regulateur de potentiel , le Galvanomètre) , sont blindés par rapport aux éléments haute tension , ce blindage doit être mis à la terre pour préserver la stabilité d'équilibre du pont .

Pont à haute fréquence

En générale ce pont travaille sous tension modérée permettant ainsi une plus grande souplesse .

La capacité Cn est variable dans ce cas et on utilise les méthodes de substitution pour déterminer la capacité Cx et le facteur $\tan \delta$. Les impédances parasites sont éliminées à l'aide du blindage ou bien avec la branche auxiliaire de Wagner .

2 . PONT A TRANSFORMATEUR , (ou pont à bras de proportion inductifs)

fig . 5 b

C'est un pont dont les bras sont couplés par inductances mutuelles , Il est utilisé dans une large bande de fréquence allant de 50 Hz jusqu'à quelques dizaines de M Hz .

Son principe est plus simple que celui du pont de Schéring .

A l'équilibre on a le même courant qui traverse les impédances Zx et Zm , alors le rapport de ces derniers est identique au rapport des tensions U₁ et U₂ ,

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_x}{Z_m} = K \quad (2.4)$$

La connaissance de ce rapport (U_1/U_2) et de Z_m , nous permet de déduire Z_x .
Lorsque le pont est parfait , le rapport $\frac{U_1}{U_2} = K$ est un nombre réel , alors

$$\text{dans ce cas ,} \quad Z_x = K \cdot Z_m \quad (2.5)$$

et l'argument de Z_m fournit directement l'angle de pertes δ_x .

Le principale avantage du pont à transformateur sur celui de Schéring , c'est de permettre une mise à la terre directe et rationnelle du blindage et des électrodes de garde , sans l'usage de branches auxiliaires additionnelles .

Les réalisations constructives de ces ponts diffèrent sensiblement , selon les fréquences choisies et cela pour les mêmes raisons que le pont de Schéring .

3 . PONT EN DOUBLE " T " fig. 5c

Ces ponts sont principalement conçus pour les mesures à des fréquences allant de 50 K Hz à 30 M Hz . Le circuit donné est en général le plus employé pour les mesures sur les diélectriques .

L'équilibre de celui-ci est obtenu par le réglage de C_H et de C_v (capacité variable qu'on branche aux bornes X , X) .

Les conditions d'équilibre sont données par :

$$\frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_B} = \frac{1}{w^2 \cdot C_A \cdot C_n ; L} \quad (2.6)$$

$$R_T \left(1 + \frac{C_H}{C_B} \right) = \frac{1}{w^2 \cdot C_A \cdot C_n ; R_F} \quad (2.7)$$

Le principe de cette méthode est le suivant :

Le condensateur variable C_v est connecté aux bornes X , X , sa capacité C_v et sa conductance G_v modifient les valeurs de L et R_F , on équilibre alors le circuit dans cette condition (c'est à dire avec C_v et sans éprouvette) .

Par la suite on relie l'éprouvette aux bornes X , X et on rééquilibre le circuit en ajustant les capacités C_v et C_H ; alors on a :

- La capacité C_x de l'échantillon qui est donnée par la diminution ΔC_v de C_v

- La conductance est :

$$G = \frac{w^2 \cdot C_A \cdot C_n ; R_T}{C_B} \cdot \Delta C_H \quad (2.8)$$

- Et le facteur $\operatorname{tg} \delta$ par la formule :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{w. C_A. C_n. R_T}{C_B} \cdot \frac{\Delta C_H}{\Delta C_V} \quad 2.9$$

Ces ponts ont un avantage de fournir de meilleurs performances dans la gamme de fréquences citée ci dessus , et ils sont faciles à blinder efficacement . Par ailleurs ils présentent un inconvénient majeur , car leur équilibre est très sensible à la fréquences , en effet aux plus hautes fréquences , les impédances parasites des fils de connexion peuvent inclure des erreurs importantes .

4 . METHODE DE RESONNANCE (ou de l'acuímètre), fig. 5 b .

Cette méthode est employée dans une bande de fréquence. Variant de 10 K Hz à 260 M. Hz , et dont le principe est basé sur la mesure de la tension qui apparaît aux bornes d'un circuit résonnant lorsqu'on y applique une tension connue .

Le principe de cette méthode est le suivant :

On ajuste la tension (ou le courant d'entrée) à une valeur connue , et cela à la fréquence de mesure considérée , puis on réglera le circuit à la résonance qui est obtenue pour la reponse maximale , on relève alors la tension U_0 .

Par la suite on relie l'éprouvette aux bornes appropriées , on accorde de nouveau le circuit à la résonance en ajustant le condensateur variable C , puis on relévera la nouvelle valeur de la tension U_1 .

Alors la capacité C_x est approximativement égale à la variation ΔC , de la capacité du condensateur variable .

Le facteur $\operatorname{tg} \delta$ de l'échantillon est donnée approximativement par la formule:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{C_t}{\Delta C} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad 2.10$$

dans laquelle : C_t est la capacité totale du circuit (même celle du voltmètre et de la bobine L)

et Q_1 et Q_0 sont respectivement les facteurs de surtension du circuit avec et sans éprouvette connectée .

$$Q_1 = \frac{U_1}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad Q_0 = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad 2.11$$

Les principales sources d'erreurs dans cette methode , sont dues à l'étalonnage des deux appareils de mesure , ainsi qu'aux impédances parasites indésirables , introduites par les fils de liaison entre le condensateur variable et l'échantillon . Pour celà tous les fils de connexion doivent être aussi courts que possible .

5 . METHODE DE VARIATION DE LA SUSCEPTANCE(ou de la réactance)

Cette méthode est recommandée pour les fréquences allant de 10 K Hz à 100 M Hz et elle possède un avantage sur la précédente , car l'utilisation du système d'électrodes micrométriques (qui fût mis au point par Hartshorn), permet d'éliminer les erreurs dues à la résistance et à l'inductance en serie des fils de liaisons , ainsi que celles du condensateur de mesure (et celà aux hautes fréquences) .

On obtient celà en utilisant un câble coaxial d'aller et retour vers les éprouvettes , et en gardant relativement constant les inductances et les résistances (avec ou sans échantillon) .

Le principe de mesure est le suivant :

On fixe tout d'abord l'éprouvette entre les électrodes micrométriques (fig.6) puis on ajuste le circuit à la résonance . Ensuite on enlève l'éprouvette; et la capacité totale dans le circuit est réglée à sa valeur initiale en rapprochant les électrodes micrométrique , ou bien en réajustant le condensateur étalon .

La capacité C_p de l'éprouvette est calculée d'après un tableau donné par les normes de l'U.T.E, [1]

Le facteur δ est défini par la formule :

$$\text{tg } \delta = \frac{(\Delta C_1 - \Delta C_0)}{2 C_p} \quad (2.12)$$

Dans cette formule :

- ΔC_1 représente la différence entre les capacités du condensateur variable (4) qui conduisent de part et d'autre de la résonance , à une tension à l'entrée du détecteur égale à $\sqrt{2}/2$ de la tension de résonance.

- ΔC_0 représente la même différence lorsque l'éprouvette est enlevée lors des essais d'après cette méthode, la fréquence reste constante pendant l'ensemble des mesures.

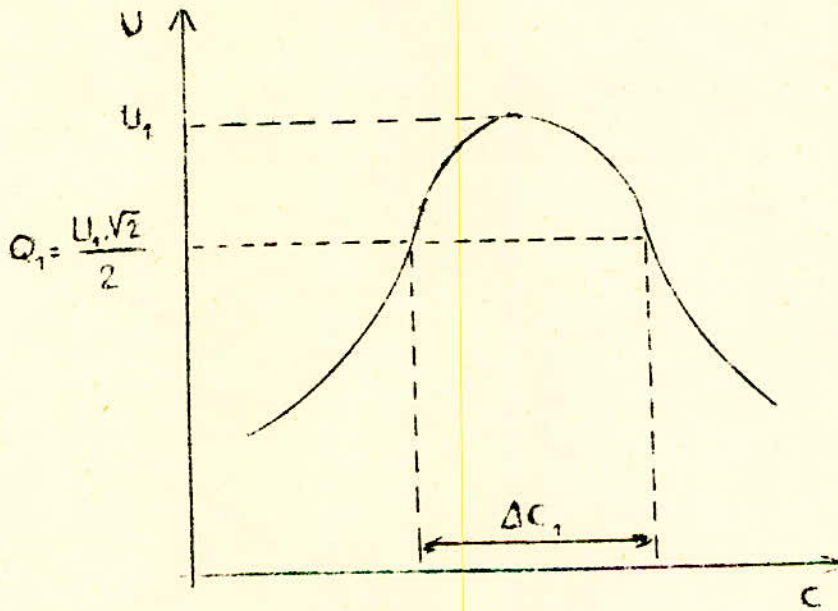


Fig. 2.1

- Courbe de résonance pour la détermination de $\text{tg} \delta$ par les méthodes de résonance.

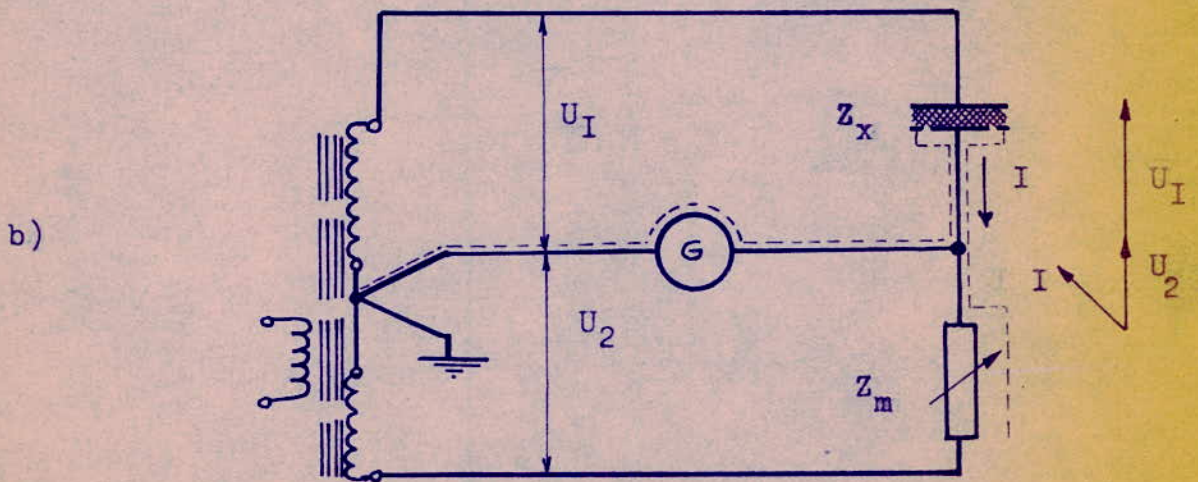
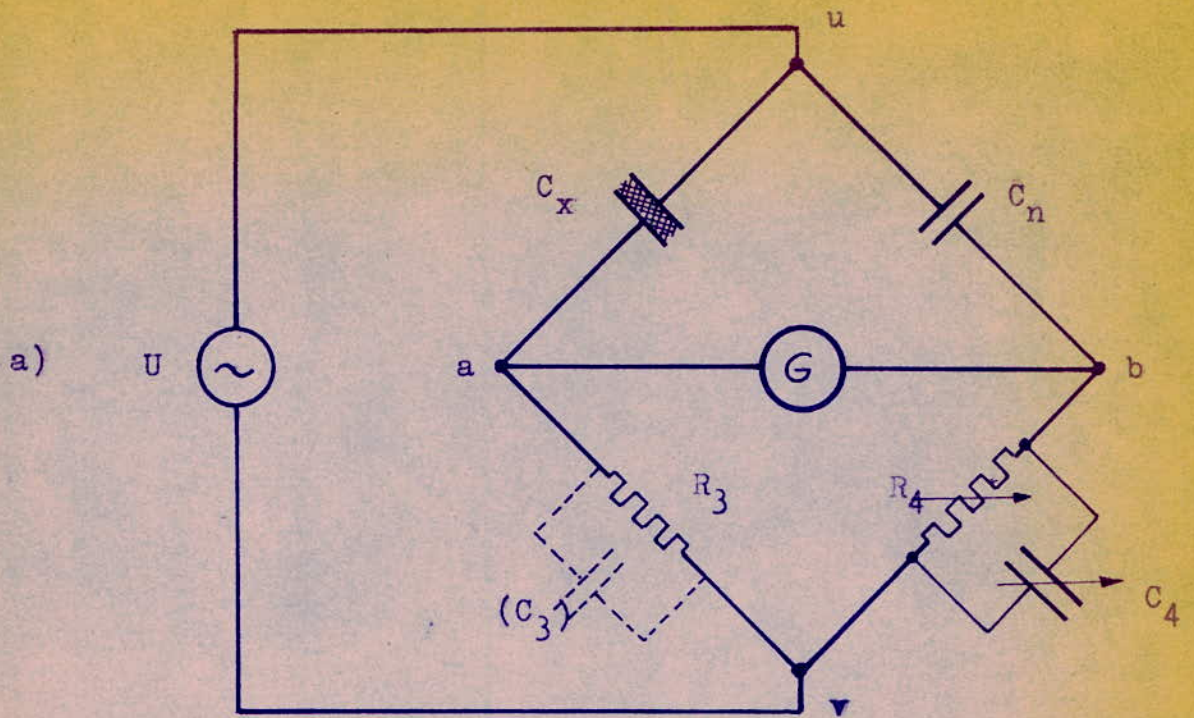


Fig. 5

Schema de principe pour la mesure de "C" et "tg δ".

a) Pont de Schering.

b) Pont à Transformateur.

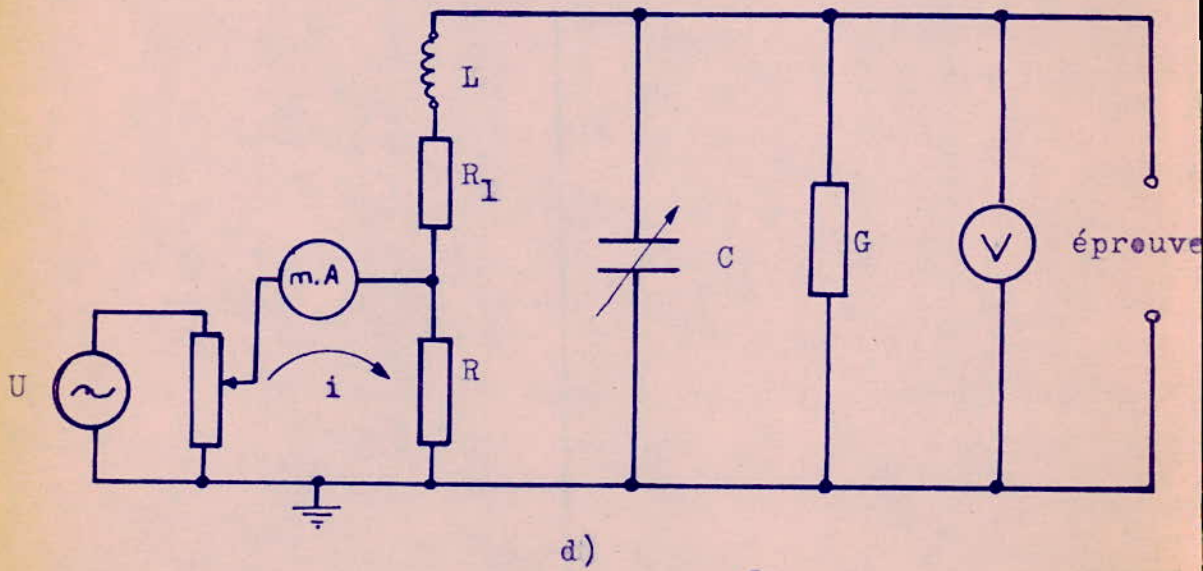
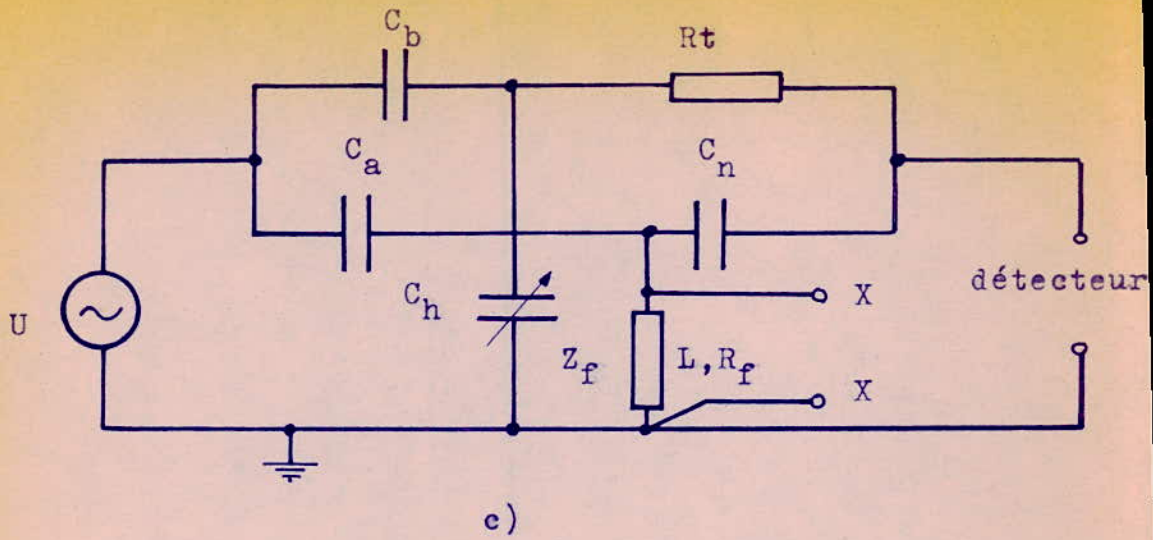


Fig. 5

Schema de principe pour la mesure de " C " et " $\text{tg} \delta$ "

c) Pont en "Double T".

d) Pont "Methode de resonance".

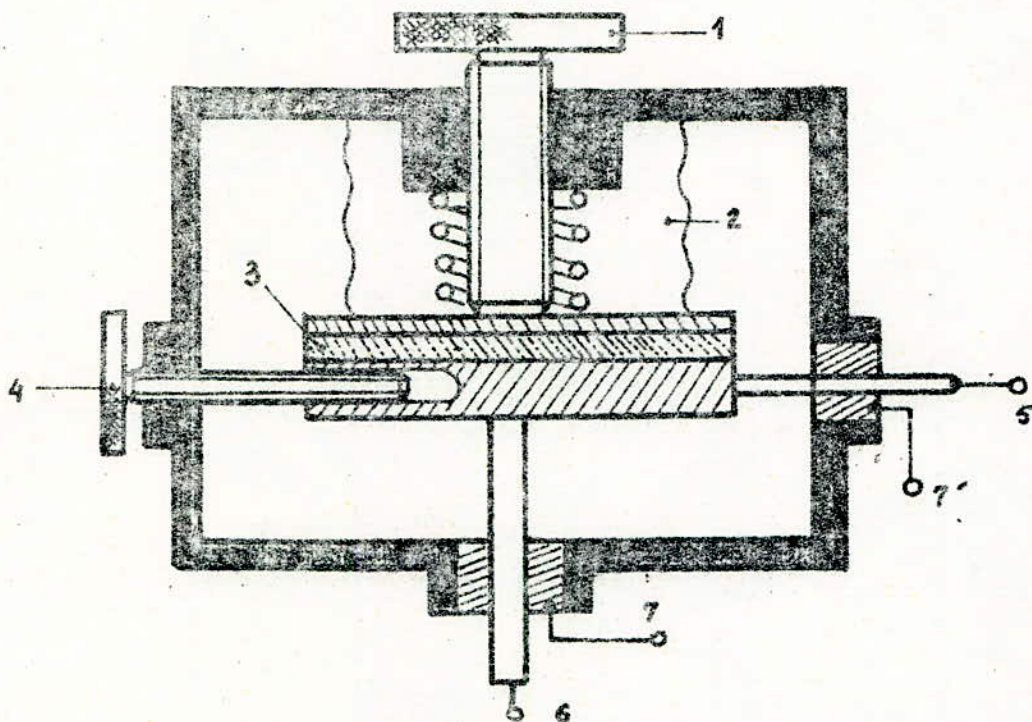


Fig.6 .

Système de condensateur micrométriques . [5]

Pour la mesure de C_x et $tg \delta$ des diélectriques solides

1. Vis micrométrique .
2. Soufflet métallique de raccordement de l'électrode mobile .
3. Eprouvette .
4. Condensateur variable avec vis micrométrique .
5. Borne de raccordement du voltmètre .
6. Borne H.T (vers le détecteur) .
- 7 et 7' Bornes de masse .

C H A P I T R E III

LABORATOIRE D'ESSAI POUR LES MESURES DU FACTEUR $tg \delta$ ET LA CAPACITE C_x .

3.1 GENERALITES

Dans ce chapitre nous rappellerons l'ensemble des dispositifs et des appareils d'un laboratoire , destiné pour les essais du facteur $tg \delta$ et de la capacité C_x .

Ils sont représentés dans la fig. 3.1 , ou l'on peut distinguer les cinq groupes suivants :

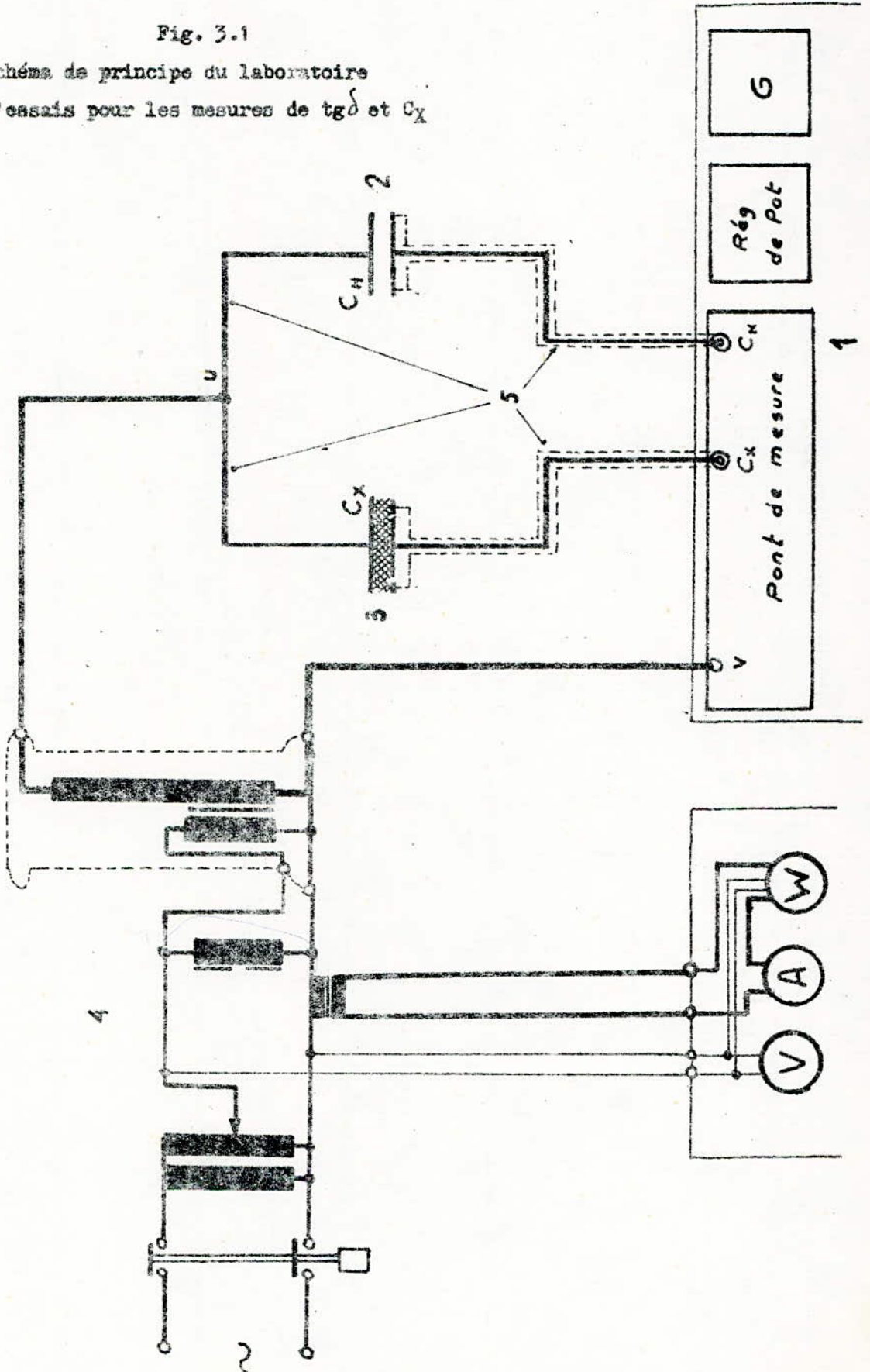
- Dispositif de mesure de $tg \delta$ et de C_x (1)
(par exp: le pont de schéring et ses accessoires) .
- Condensateur étalon C_n (2)
- L'objet à essayer qui peut être représenté par C_x (3)
- Source de tension avec dispositif de régulation (4)
- Liaisons d'alimentation et de mesure (5)

Les différents groupes constituant le laboratoire peuvent avoir des formes et des dimensions très variés en fonction de la tension de mesure , de la grandeur de l'objet à essayer et de la précision voulue.

Les mesures du facteur $tg \delta$ et de la capacité C_x peuvent être très simples dans le cas de mesure avec la basse tension et très complexes , lorsqu'on utilise comme tension de mesure les hautes tensions de valeurs élevées et lorsqu'on varie les conditions d'ambiance (par exp. la température , l'humidité , la pression ...) .

Fig. 3.1

Schéma de principe du laboratoire
d'essais pour les mesures de $\text{tg} \delta$ et C_x



3.2. Mesure de $\text{tg } \delta$ et de C_x à l'aide du pont de Schéring .

C'est pour le contrôle et la surveillance du fonctionnement des installations à haute tension que le professeur H.Schéring à mis au point en 1919 le premier pont conçu pour des mesures à haute tension et spécialement agencé pour la mesure du facteur de pertes $\text{tg } \delta$ et de la capacité C_x . En effet ce dispositif est d'un usage très courant de nos jours , pour l'étude des propriétés diélectriques des matériaux, ainsi que leur état de fonctionnement déterminé par le vieillissement et par d'autres influences extérieures. Avant de donner la description de ce pont, nous allons tout d'abord présenter le principe de mesure de $\text{tg } \delta$ et de C_x . Par la suite on donnera la prédétermination des différents paramètres du pont en fonction de la tension U et de la capacité C_x en vue d'augmenter la précision des mesures .

- a) Principe de mesure de $\text{tg } \delta$ et de C_x .

Procédé de mesure .

La mesure se réalise d'après un circuit de pont donné par le Schéma de principe fig.3.2.

L'objet à essayer de capacité C_x , est comparé avec un condensateur étalon dont la capacité C_N et le facteur de pertes sont connus avec précision.

L'équilibre du pont est obtenu par les variations des décades de résistances R_3 , R_4 et de la décade de capacité C_4 .

Les données de R_3 , R_4 , C_4 et de C_N nous permettent de déterminer $\text{tg } \delta$ et C_x à l'aide de formules simples, que nous allons voir dans le principe de mesure.

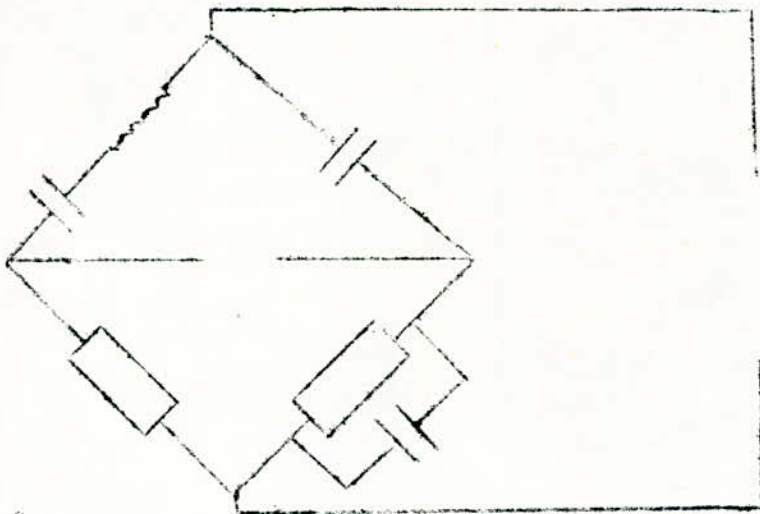


fig 3 . 2

Schéma de principe du pont de Schéring.

Principe de la mesure

On supposera que le condensateur étalon C_n est sans pertes et que l'on adoptera pour l'objet à essayer le schéma équivalent série (Ch.I. par.1.3), alors les impédances des quatres branches du pont sont données par les formules suivantes :

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = \frac{1}{j\omega C_x} (1 + j\omega R_x \cdot C_x) , \quad (3.1)$$

$$Z_n = \frac{1}{j\omega C_n} , \quad (3.2)$$

$$Z_3 = R_3 , \quad (3.3)$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 \cdot C_4} ; \quad (3.4)$$

A l'équilibre du pont aucun courant ne passe à travers le galvanomètre G et l'on a :

$$J_G = 0 ; \quad J_x = J_3 \quad \text{et} \quad J_n = J_4 \quad (3.5)$$

la relation (3.5) entraine que les points a et b du pont sont au même potentiel alors on a :

$$\begin{aligned} U_x = J_x Z_x = J_n \cdot Z_n = U_n , \\ U_3 = J_3 Z_3 = J_4 \cdot Z_4 = U_4 . \end{aligned} \quad (3.6)$$

Des relations (3.5) et (3.6) on aura :

$$Z_x \cdot Z_4 = Z_n \cdot Z_3 . \quad (3.7)$$

Remplaçons maintenant les impédances par leurs expressions ; la relation (3.7) devient :

$$\frac{1}{j\omega C_x} (1 + j\omega R_x \cdot C_x) \cdot \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 \cdot C_4} = \frac{1}{j\omega C_n} \cdot R_3 . \quad (3.8)$$

Les conditions d'équilibre sont données à partir de la relation (3.8)
lorsqu'on a :

$$1 + j \omega R_x \cdot C_x = 1 + j \omega R_4 \cdot C_4 \quad (3.9)$$

et

$$\frac{R_4}{j \omega C_x} = \frac{R_3}{j \omega C_n} \quad (3.10)$$

Alors ces conditions nous permettent de déterminer la capacité C_x et le facteur de pertes $tg \delta$ qui sont données par les formules connues .

$$C_x = C_n \frac{R_4}{R_3} \quad (3.11)$$

et

$$tg \delta = \omega R_4 C_4 \quad (3.12)$$

b) Choix des différents paramètres du pont de Schéring en fonction de la tension U et de la capacité C_x .

Il est recommandé de calculer approximativement et d'ajouter les valeurs des paramètres prévus du pont , avant d'effectuer les mesures , en vue d'augmenter la précision des résultats et de vérifier que les intensités à travers les branches de résistances n'exèdent pas les intensités maximales admissibles . La détermination de ces paramètres peut être fait par un calcul simple ou bien à l'aide des nomographes (p. 3.8 et 3.9) , généralement établis par le fournisseur du pont de mesure .

Détermination par calcul . si la tension de mesure U et la valeur approximative de la capacité C_x sont connues , on calcul le courant J_x à travers l'objet à essayer en négligeant la chute de tension due à la résistance R_3 . On a alors :

$$U \approx U_x \quad J_x = U \cdot \omega \cdot C_x \quad (3.13)$$

à l'équilibre du pont

$$J_G = 0 \quad J_x = J_3 \quad (3.5)$$

La tension aux bornes de R_3 SERA :

$$U_3 = J_3 R_3 = J_x \cdot R_3 \quad (3.14)$$

On détermine R_3 pour $U_3 = 1 \text{ à } 3 \text{ V environ}$.

Ainsi on considérera la charge maximale à travers R_3 .

Avec la valeur de R_3 , on calcul le produit $C_4 \cdot R_4$

qui est donné par :

$$C_4 \cdot R_4 = C_x \cdot R_3 \quad (3.15)$$

La valeur de la capacité C_n étant connue , on détermine alors la valeur de la résistance R_4 .

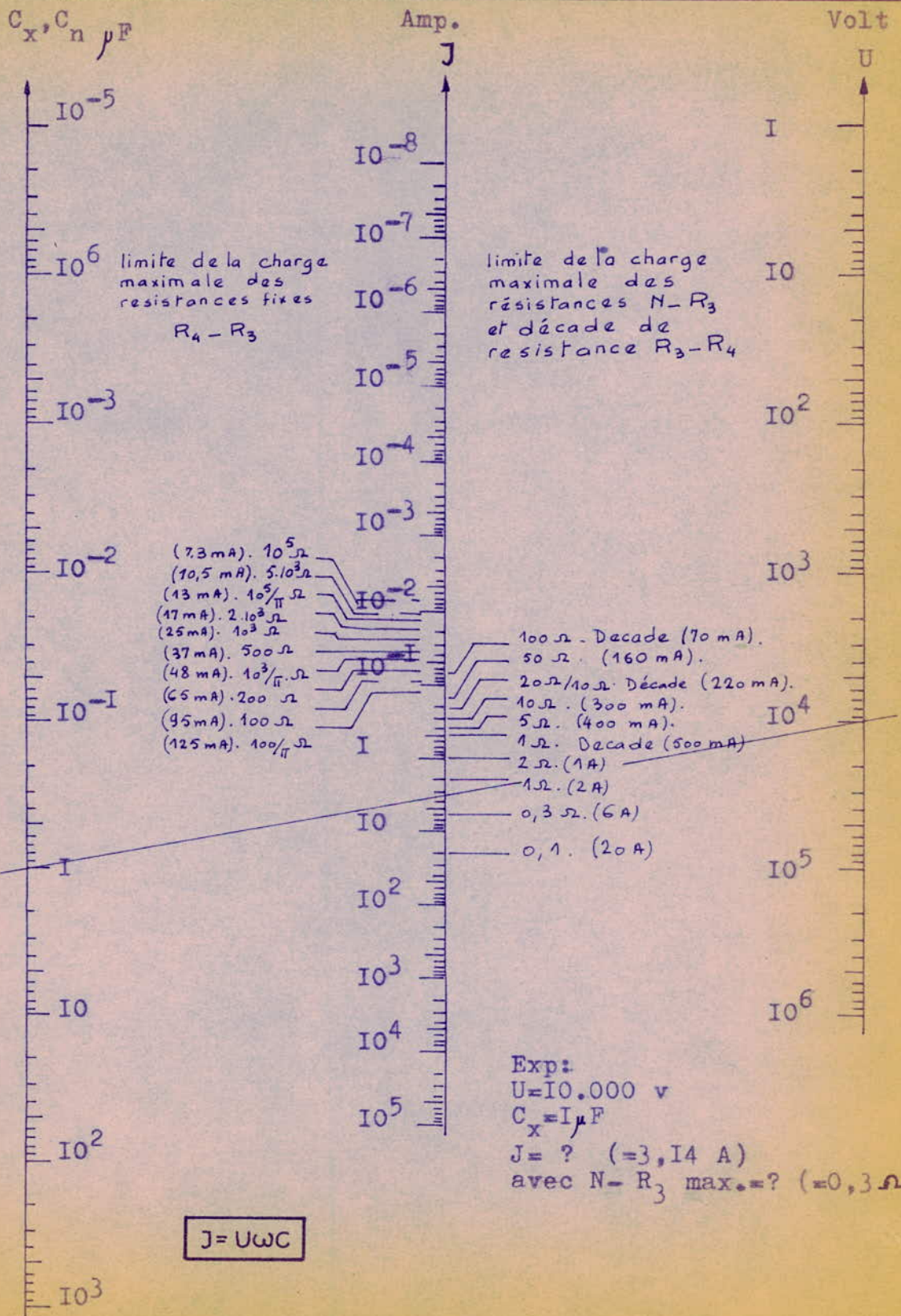
Ainsi toutes les données du pont sont déterminées .

Détermination à l'aide des nomogrammes

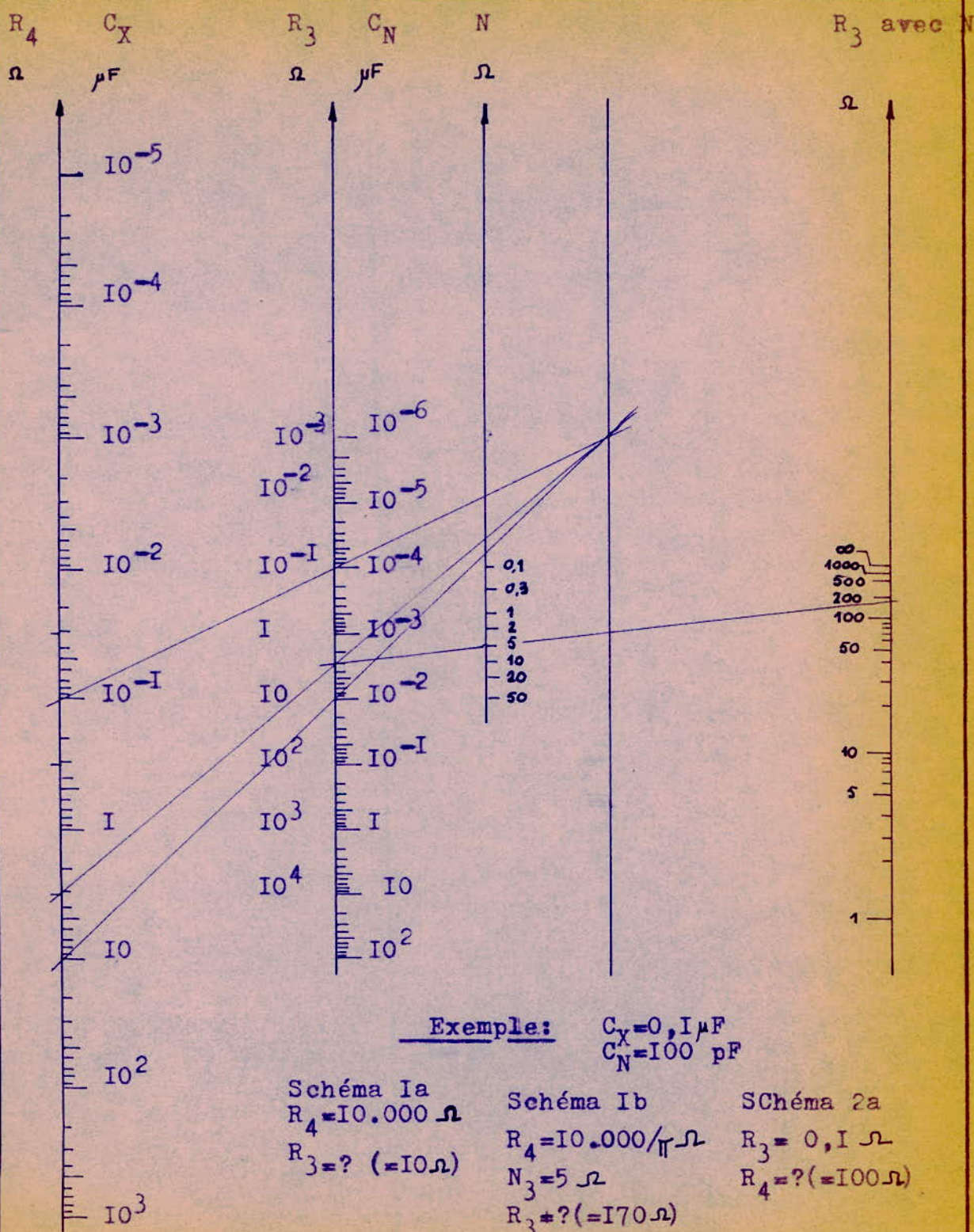
Les données du pont peuvent être prédéterminé d'une façon très simple à l'aide des deux nomogrammes (p. 3.8 et 39) , sur lesquels on trouvera deux exemples de prédétermination .

Ces nomogrammes sont établis selon les formules précédentes et avec une précision plus grande que celle obtenue par le calcul approximatif .

Nomogramme pour la détermination de la tension de mesure admissible au maximum, ainsi que le courant à travers C_x et C_n pour les mesures à 50 Hz avec le pont de Schering, Type 280I.



Nomogramme pour le prééquilibrage du pont de Schering. Type 2801.



c) Precision des mesures

La précision des mesures est directement influencée par la forme et la valeur de la tension de mesure ainsi que par le choix de la capacité C_N du condensateur étalon en fonction de la capacité C_x de l'objet à essayer .

La forme de la tension de mesure doit être autant que possible exempte de déformations , afin d'éviter les erreurs de mesures dues aux harmoniques d'ordre supérieures .

En effet si celle-ci présente de faibles harmoniques , elles seront d'autant plus , mises en évidence par la charge capacitive de l'objet à essayer. On remédie à cela en utilisant des sources d'alimentation , donnant une courbe de tension dont la forme doit être voisine de celle d'une sinusoïde avec ses deux alternances sensiblement identiques.

La Capacité C_N du condensateur étalon doit être du même ordre de grandeur ou bien inférieure à la capacité C_x , afin que la sensibilité maximale du pont soit atteinte .

La Sensibilité du pont de mesure est donnée par la formule :

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \Delta \text{tg} = \frac{J_G}{U \cdot w \cdot C_N} \left(1 + \frac{R_G}{R_4} + \frac{C_N}{C_x} \right) \quad (3.16)$$

Ce qui nous permet de faire une constatation sur la précision des mesures de C_x et tg .

Dans cette formule (3.16) on a :

U = Tension de mesure en (V) .

J_G = Le plus petit courant constaté dans le galvanomètre en (A) .

R_G = Résistance de l'indicateur à zéro en

R_4 = Résistance de branche en (Ω)

w = Pulsation ($2\pi \cdot f$) .

C_N = Capacité étalon en (F)

C_x = Capacité de l'objet à essayer en (F) .

Exemple :

$$\begin{array}{ll} C_N = 100 \text{ p F} & R_4 = 1000 \text{ } \Omega \\ w = 314 & U = 100.000 \text{ V} \\ R_g = 600 \text{ } \Omega & J_G = 1.10^{-9} \text{ A} . \\ C_x = 100 \text{ p F} & \text{tg} \delta = 8 \cdot 10^{-7} . \end{array}$$

d) Présentation du dispositif de mesure .

Le schéma de principe donné par la fig . 3.1 , représente l'ensemble de l'équipement d'un laboratoire d'essais pour la mesure de $\text{tg} \delta$ et de C_x . Comme nous l'avons déjà dit un tel laboratoire se compose du pont de mesure , du régulateur de potentiel , de l'indicateur à zéro , du condensateur étalon , des liaisons de mesures et des liaisons d'alimentation .

Maintenant nous allons donner plus d'information sur chacune des parties de ce dispositif de mesure .

1) Le pont de mesure dont le schéma général est présenté dans la page 3.12 , se compose de condensateurs et de résistances constantes et variables qui servent à l'équilibrage du pont . Celles-ci sont fabriquées sous formes de décades de résistances (R_3 , R_4) et de la décade de capacité (C_4) .

Tout cet ensemble est protégé par une boîte blindé intérieurement , par une tôle en Aluminium ou un autre métal , contre les influences du champ parasite .

En plus les parties les plus sensibles sont munies d'une protection complémentaire contre les courants de fuites , afin de réduire l'influence des circuits extérieures .

2) l'indicateur à zéro (Galvanomètre) , permet de constater l'équilibre du pont . Il peut être d'un montage indépendant du pont de mesure ou bien incorporé à l'intérieur de celui-ci .

En général c'est un galvanomètre électronique à courant alternatif pour une fréquence donnée et ayant une sensibilité de mesure très grande .

Les harmoniques qui se superposent à la fréquence de base du courant mesuré sont fortement amorties par des filtres spéciaux et ne peuvent donc pas créer des erreurs.

Le Galvanomètre est aussi muni d'un blindage, évitant les perturbations dues aux champs parasites .

3) Le régulateur du potentiel de garde est un appareil servant à élever le potentiel des écrans de blindage jusqu'à celui des points a et b du pont, afin d'éliminer les capacités parasites, partielles et par rapport à la terre lors des mesures .

En effet lors de l'égalité des potentiels du point a et b, aucun courant ne passe entre ces deux points, traduisant ainsi l'élimination des capacités nuisibles.

Ce régulateur est muni d'un transformateur et d'un déphaseur afin d'ajuster les tensions de pilotages de n'importe quelle position de phase.

3.3 CONDENSATEURS ETALONS C_N

Comme nous l'avons déjà dit ,les condensateurs normaux servent d'étalon de capacité pour la mesure des pertes diélectriques et des capacités, des matériaux isolants ou des appareillage (câbles,isolateurs, transformateurs, condensateur ...).

Mais ils peuvent également, par leurs qualités de condensateurs de coupable à haute tension sans effluves, servir à la mesure des tensions alternatives à fréquences industrielle, ainsi qu'à la détermination des pertes par effet couronne des lignes aériennes en s'aidant des appareils de mesure appropriés. La tension et la capacité de ces condensateurs dépendent des caractéristiques de l'objet à essayer.

En général ils sont classés suivant leur tension de service maximale comme suit :

- Les condensateurs étalons au polystyrène et à air pour les basses tensions allant jusqu'à 2000 V .

- Les condensateurs étalons en styroflex ou aux gaz comprimés (CO_2 ; N_2 ; SF_6) pour les hautes tensions allant jusqu'à 1000 K V et plus.

Vue l'importance qu'ils occupent nous allons présenter leurs principales propriétés, tout en donnant une description sommaire d'un condensateur étalon à gaz comprimé utilisé dans le domaine de la haute tension.

a) PROPRIETES DE CES CONDENSATEUR ETALONS .

La constance de la capacité et la minimisation des pertes sont les principales propriétés de ces condensateurs.

La capacité doit garder une valeur pratiquement constante lorsque la tension et les conditions du laboratoire varient (pression, humidité, poussière, température, ...).

Les pertes diélectriques doivent être aussi faibles que possible afin que ces condensateurs puissent être représentés seulement par des capacités.

b) CONSTITUTION D'UN CONDENSATEUR ETALON . A
GAZ COMPRI ME DE 60 KV, 100 p F .

La représentation par une vue coupée et le schéma de principe de ce condensateur sont donnés par la Fig 3.3.

Il est constitué de quatre parties principales à savoir :

- Boitier (1) Servant de réservoir sous pression, avec une vis pour connecter la ligne haute tension.

Les électrodes du condensateur proprement dit sont constituées généralement par des plaques d'Aluminium parfaitement polies.

- Plaque à bornes qu'on appelle tête de connexions, pour la liaison au pôle de mesure (2) , au blindage (0) , et à la terre (T) !

- Manomètre (3) , avec soupape de remplissage

- Chariot (4) , destiné au déplacement du condensateur, il est séparé du boitier par des isolateurs (5) pour haute tension.

De plus ces condensateurs sont munis d'un blindage spécial et des électrodes de garde, pour éliminer les capacités parasites à l'aide d'un réglage du potentiel (par le régulateur du potentiel ou par la branche auxiliaire de Wagner) !

c) Etalonnage de ces condensateurs .

Sur leurs plaques signalétiques sont indiquées les valeurs précises de la capacité C_N et du facteur de pertes $tg \delta_n$ (en général très faible) au moment de l'étalonnage .

Cependant ces valeurs peuvent changer si ces appareils travaillent dans de mauvaises conditions telles que dans des locaux constamment humides , ou bien dans des régions ou la température varie beaucoup (p.exp.au Sahara) . L'humidité de l'air peut conduire à une répartition défavorable des tensions le long du condensateur et à une réduction de la rigidité diélectrique . Pour cela il est nécessaire que les conditions d'ambiance soient stables .

3.4 SOURCE DE TENSION HABITUELLE

La source d'alimentation d'un laboratoire d'essais de C_x et $tg \delta$ doit avoir la possibilité de régulation de la tension . Pour les essais à haute tension de fréquence industrielle , on utilise des transformateurs d'essais avec des régulateurs .

Dans la Fig.3.4 sont représentés les principaux dispositifs d'une telle source qui peut fournir une haute tension réglable et exempte de déformations aux bornes de l'objet à essayer .

Cette installation se compose essentiellement du transformateur d'essais à haute tension et de différents éléments séparés, tels que le transformateur de réglage, la bobine de compensation et le pupitre de commande .

a) Transformateur d'essais (3) , a une construction spéciale pour supporter les contraintes dynamiques , électriques et thermiques qui peuvent résulter de la perforation ou du contournement du modèle lors des essais .

Ces transformateurs sont en général à refroidissement dans l'huile, car ils présentent une capacité de surcharge importante ainsi qu'une meilleure résistance aux perforations par sur tension, que les transformateurs à refroidissement dans l'air .

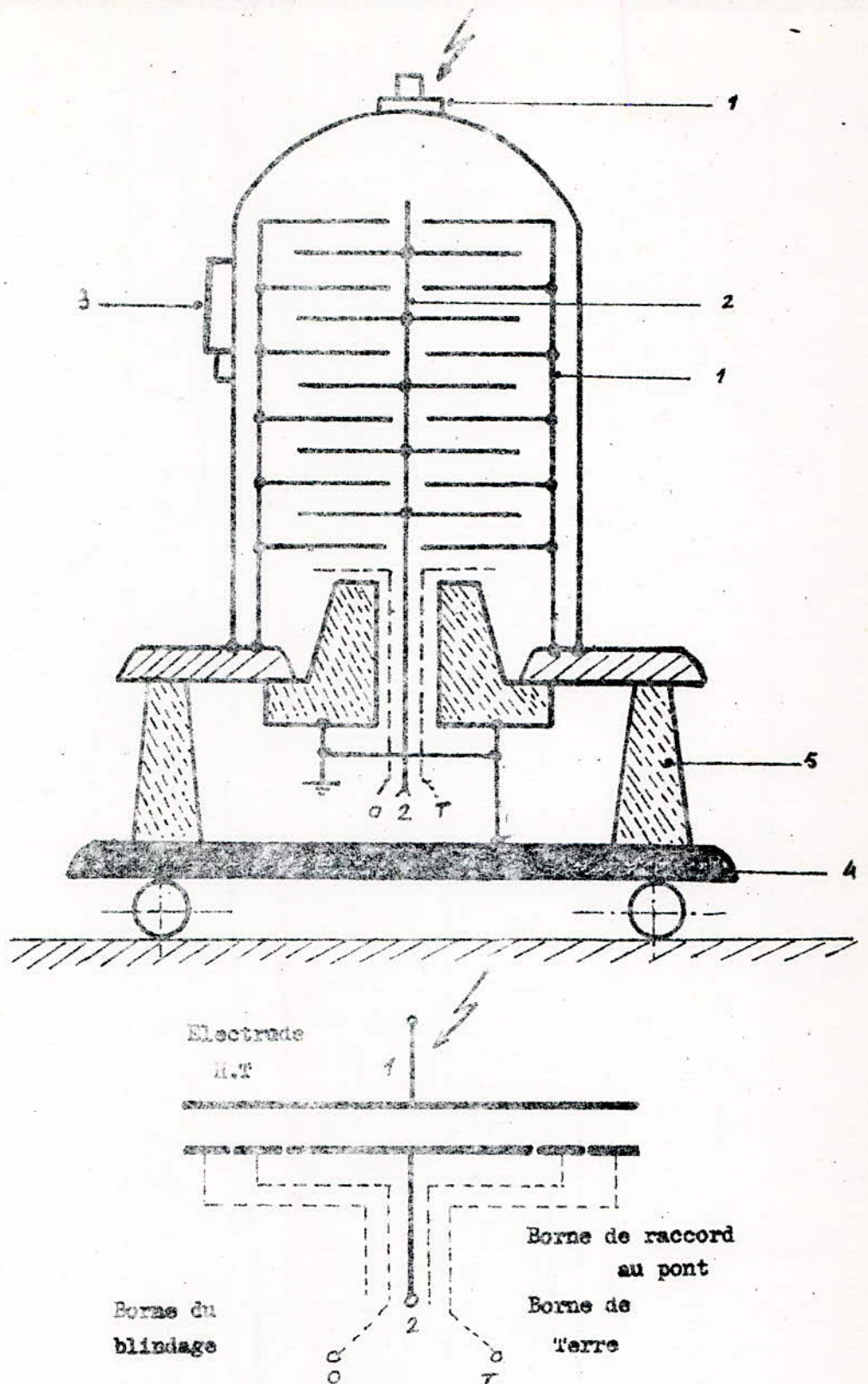


Fig.5.3 CONDENSATEUR ETALON A GAZ COMPRESME

a) Représentation en coupe

b) Schéma de principe

b) Le transformateur de réglage (1) assure l'alimentation en tension du transformateur d'essais, cette tension peut varier de zéro jusqu'à la valeur nominale .

La variation doit être effectuée d'une manière continue par des échelons suffisamment petits de zéro jusqu'à la valeur voulue .

Les transformateurs de régulation sont du type à curseur et refroidissement dans l'air. La régulation s'effectue à l'aide de contacts glissants sur l'enroulement secondaire , déplaçables verticalement au moyen d'un volant ou à l'aide d'un moteur commandé à distance .

c) La bobine de compensation (2).

L'objet à essayer étant de nature capacitive, soumet la source de tension à un fonctionnement déséquilibré.

Pour remédier à cela on branche au secondaire du transformateur de réglage une bobine de compensation qui absorbe une grande partie de la puissance réactive fournie par l'objet à essayer .

d) Le pupitre de commande (4) comprend les instruments

de mesure (servant normalement à l'indication de la tension et du courant ainsi que la puissance active au secondaire du transformateur de réglage) , les organes de commande du transformateur de régulation , le contacteur principal ainsi que les dispositifs de signalisation et de protection du personnel.

3.6 LIAISONS D'ALIMENTATION ET DE MESURE .

L'alimentation des différents appareils constituant le dispositif d'essai peut poser certains problèmes si les règles, concernant la mise en place des câbles de liaisons dans les laboratoires à haute tension ne sont pas respectées.

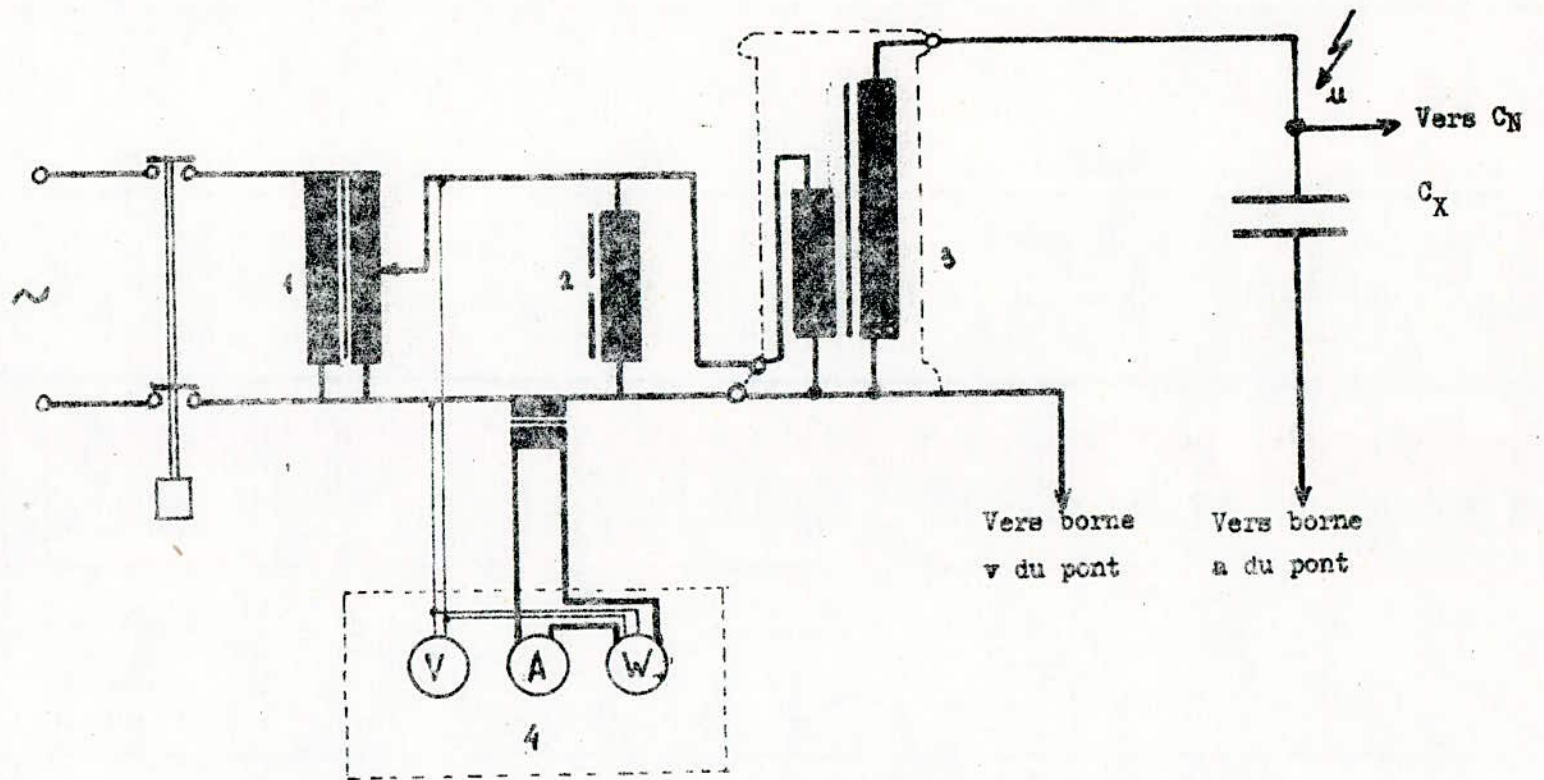


Fig.3.4 Schéma de principe de l'alimentation d'une station d'essais

- 1) Transformateur de réglage
- 2) Bobine de compensation
- 3) Transformateur d'essais
- 4) Pupitre de commande

En effet toute variation brusque résultant de la décharge d'un générateur de choc ou bien de l'amorçage d'un objet à essayer, produit une onde électromagnétique à haute fréquence et cela donne naissance à des tensions induites dans les circuits basse tension (p . exp. de mesure) lorsqu'ils présentent des boucles. Afin d'éviter ces phénomènes qui peuvent être néfastes pour le matériel, pour l'expérimentateur et les résultats de mesure, on doit éviter les boucles ainsi que l'enchevêtrement désordonné des différents conducteurs.

Pour cela les Câbles d'alimentation des différents organes du dispositif d'essai doivent être regroupés en faisceaux blindés et placés dans des canalisations souterraines.

La dimension des liaisons de haute tension doit être choisie très soigneusement pour éviter l'apparition des éffluves.

Par contre pour les Câbles de mesure et en particulier ceux des liaisons du pont avec l'objet à essayer et le condensateur étalon, ainsi que ceux reliant le pont avec le régulateur du potentiel et l'indicateur à zéro doivent être tous blindés et leur blindage mis à la masse du pont de mesure, afin d'éviter toutes les perturbations et les risques d'erreurs dus aux impédances parasites des câbles .

Ces liaisons de mesure sont des câbles coaxiaux constitués par un blindage simple ou double et ils peuvent différer selon la fonction qu'ils remplissent. En général ils sont caractérisés par leur composition, leur résistance, leur capacité et la section du conducteur interne .

Nous donnons à titre d'exemple les caractéristiques d'un câble coaxiale destiné pour lier un condensateur étalon au pont de Schéring . [6] :

- Câble unipolaire, flexible à double blindage.
- Isolation au polythème / P.V.C
- Section interne du conducteur : 8 mm^2
- Résistance : $2 \cdot 10^{-3} / \text{m}$
- Capacité du premier blindage : 200 p.F/m
- Capacité du deuxième blindage : 1200 pF/m

- C H A P I T R E IV -

MESURE DE $tg\delta$ ET C_X AVEC LE PONT DE L'E.N.P.A.

4.1 G E N E R A L I T E S

Les recherches que nous avons effectuées avec le pont de Schéring du laboratoire haute tension de l'Ecole National Polytechnique d'Alger étaient des mesures simples, sur deux modèles d'essais de dimensions et de tension correspondant aux possibilités du laboratoire.

Les mesures d'une plus grande importance n'ont pu se faire, car la tension maximale des condensateurs étalons disponibles est de 1000 V.

Nous donnerons dans ce qui suit quelques informations sur la station d'essais et sur les modèles utilisés.

4.2. STATION D'ESSAIS DE $tg\delta$ ET C_X DE L'E.N.P.A.

L'équipement de la station d'essais que nous avons utilisé lors des mesures est le suivant :

a) Le pont de Schéring de l'E.N.P.A. , est un appareil de précision commutable dont les caractéristiques sont données ci-après.

Les branches incorporées dans le pont permettent de mesurer des condensateurs avec des courants de charge allant jusqu'à 2 A.

Pour les courants de 2 à 20 A, on utilise un shunt extérieur et pour les courants supérieurs un transformateur d'intensité de précision.

La décade R_3 est formée par la mise en série de trois résistances variables de $10 \times (100 + 10 + 1) \Omega$ plus un fil à curseur subdivisé en 110 divisions de $0,01 \Omega$ pour le réglage fin du pont.

La décade R_4 est une résistance ajustable avec les positions suivantes :
 $100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, \frac{100}{\pi}, \frac{1000}{\pi}, \frac{10000}{\pi} \Omega$.

Les shunts internes sont réglables par un commutateur avec les positions :
1, 2, 5, 10, 20, 50 Ω et une position N_{ext} pour l'utilisation du shunt extérieur.

La décade C_4 est constituée par la mise en parallèle de trois condensateurs de $10 \times (0,1 + 0,01 + 0,001) \mu F$ plus un condensateur variable de 50 à 1100 F pour l'équilibrage précis du pont.

b) Le régulateur du potentiel de garde est prévu pour être alimenté par le secteur à la fréquence de 40,50 ou 60 Hz aux tensions de 110, 125, 145, 160, 220, 250 V.

Cet appareil fournit une tension réglable en grandeur et en phase de 0 à 50 V à l'aide des quatre boutons de commande.

c) L'indicateur à zéro est conçu pour fonctionner sous une tension de 220 V, à la fréquence de 40,50 ou 60 Hz.

Sa résistance interne R_G est de 1000Ω . La plus petite déviation constatable correspond à un courant de $5 \cdot 10^{-10} A$, c'est à dire à une différence de potentiel de $0,5 \mu V$ à 50 Hz.

d) Les condensateurs étalons disponibles au laboratoire de L'E.N. P.A. sont au nombre de trois et leur tension maximale est de 1000 V. Ils sont isolés au polyéthylène et leur température nominale de service est de $23^\circ C$.

Les caractéristiques propres à chaque condensateur sont :

1- Condensateur de capacité normale $0,001 \mu F$, avec un facteur de pertes de $8 \cdot 10^{-5}$ (à 500 V, 50 Hz).

1- Condensateur de capacité normale de $0,01 \mu F$, avec un facteur de pertes de $6,9 \cdot 10^{-5}$ (à 500 V, 50 Hz).

1- Condensateur de capacité normale de $0,1 \mu F$, avec un facteur de pertes de $8,2 \cdot 10^{-8}$ (à 500 V, 50 Hz).

e) Le shunt extérieur est constitué de deux résistances sans déphasage de 0,3 et $0,1 \Omega$ permettant des courants allant respectivement jusqu'à 6 et 20 A.

f) Câbles de mesure. Il est prévu trois câbles spéciaux pour les liaisons du pont : avec le condensateur étalon, avec l'indicateur à zéro et avec le shunt extérieur.

Leurs caractéristiques sont données ci-après :

Pour les liaisons du condensateur étalon et du shunt extérieur, on a deux câbles unipolaires, flexibles avec simple blindage et son isolation est au polythène / P.V.C. la section du conducteur interne est de 8 mm^2 et leur longueur est de 2m.

La résistance est de $2,1 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}$ et la capacité du conducteur interne avec le blindage est de $200 \text{ pF}/\text{m}$.

Pour la liaison de l'indicateur à zéro, on a un câble bipolaire, flexible avec simple blindage et son isolation est au P.V.C.

Il a une longueur de 1m et la section des conducteurs internes est de $2 \times 0,55 \text{ mm}^2$. La capacité d'un conducteur interne avec le blindage est de $180 \text{ pF}/\text{m}$, et celle entre deux conducteurs est de $16 \text{ pF}/\text{m}$.

4.3 DISPOSITION DE L'EQUIPEMENT

Au cours de nos essais la disposition de l'équipement était comme l'indique la figure 4.1. On voit sur la photographie au premier plan le pont de mesure, à sa droite le régulateur du potentiel et l'indicateur à zéro et à sa gauche le shunt extérieur.

Au second plan à droite on a le condensateur étalon et à gauche notre objet à essayer, transformateur de courant de 40 KV.

Les détails de l'équipement de ce laboratoire sont représentés dans les figures 4.2 et 4.3.

4.4 MODELE A ESSAYER.

Les mesures étaient effectuées sur un transformateur de courant et une plaque isolante en plexiglass. Avant de procéder à ces mesures nous avons tout d'abord préparé les deux objets à essayer.

La préparation du transformateur était limitée à son nettoyage extérieur et à un raccordement soigneux au circuit de mesure et d'alimentation. Ce transformateur ne comprend pas une cuve métallique (comme pour les transformateur de puissance), ce qui nous a limité d'étendre les mesures. En ce qui concerne le modèle en plexiglass la préparation était plus longue et plus délicate car elle consistait à découper et nettoyer le diélectrique, former les électrodes et les coller sur le plexiglass, cela d'une façon précise et suivant les normes [1] et [2].

1- Modèle à essayer : Transformateur de courant.

Les caractéristiques du transformateur sont les suivantes : rapport de transformation 50/5 A, puissance apparente 15 VA, tension nominale 40 kV, 50 Hz. La mesure de $tg \delta$ et de C_X du transformateur a été faite entre la borne (H.T + B.T) et la masse, ce cas est représenté schématiquement sur la figure 4.4. Sur cette figure nous avons donné aussi, la représentation schématique des différentes isolations du transformateur.

Détermination des différents paramètres du pont.

Pour la tension de mesure utilisée de 220 V, 50 Hz et la capacité C_X de l'objet à essayer supposée de 0,1 nF, le courant dans la branche du transformateur était calculé pour $U_X \approx U = 220$ V, on a obtenu :

$$J_X \approx U \omega C_X = 220 \cdot 314 \cdot 0,1 \cdot 10^{-9} \approx 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ A.}$$

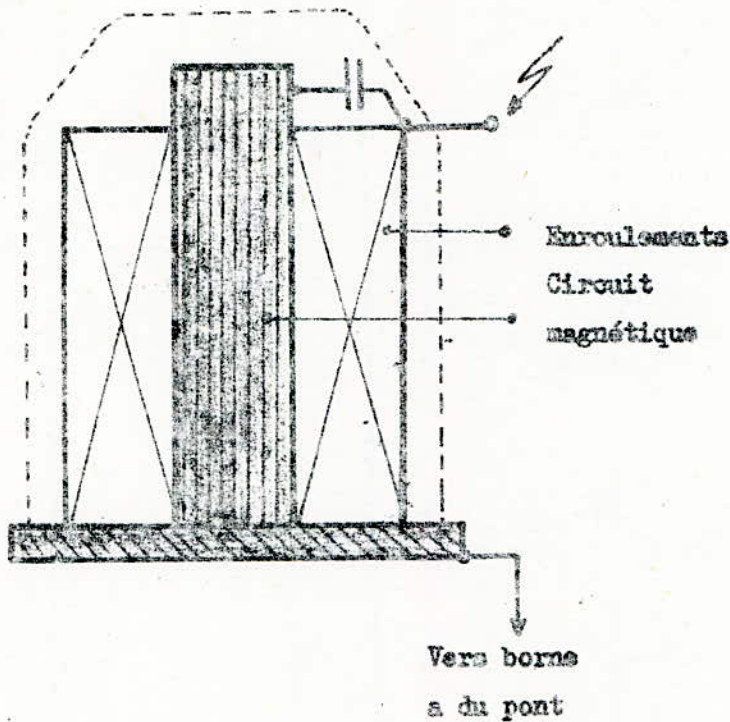
(Ce courant J_X peut être aussi déterminé à l'aide du nomographe, de la page 3.7, en ce basant sur les valeurs de $U = 220$ V et $C_X \approx 0,1$ nF).

Comme on le constate le courant J_X est très faible, cela provient d'une part de la faible capacité de l'isolation et d'autre part de la tension de mesure et relativement petite.

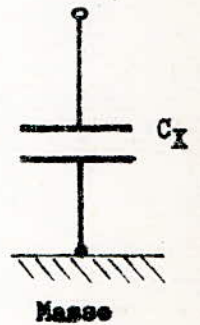
La valeur de la capacité du condensateur étalon à choisir a été déterminé en fonction de la tension de mesure et de C_X , et cela à l'aide du nomographe de la page 3.7.

a) Objet à essayer

b) Représentation schématique de l'isolation mesurée.



Borne H.T. + B.T.



Borne H.T.

Borne H.T. + B.T.

Borne H.T.

Borne B.T.



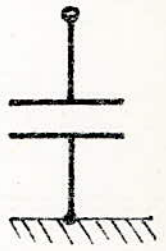
Borne B.T.



Masse



Masse



Masse

Fig . 4.4

Représentation schématique des différentes isolations d'un transformateur.

On a obtenu : $C_n = 0,1 \text{ nF}$.

Dans le laboratoire de l'E.N.P.A. le condensateur ayant la valeur la plus proche de celle-ci est de 1 nF .

En général on détermine la résistance R_3 pour une chute de tension U_3 de 1 à 3 V, afin de considérer la charge maximale de cette résistance.

Mais dans notre cas, le courant $J_3 \approx J_x = 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ A}$, étant très faible et la valeur maximale que peut prendre R_3 étant de 1110Ω , alors la chute de tension a travers R_3 est négligeable (pour $R_3 = 1110 \Omega$ on a $U_3 \approx R_3 J_x = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ V}$).

Pour cela nous fixons $R_3 = 1000 \Omega$.

La valeur de R_3 étant choisie, on déduit la valeur de R_4 à partir de la relation (3.11) :

$$R_4 = \frac{C_x}{C_n} R_3 = \frac{0,1 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot 10^{-9}} \cdot 10^3 = 10^2 \Omega$$

$$R_4 = 100 \Omega.$$

Ainsi tous les paramètres du pont sont choisis.

L'équilibre du pont est obtenu pour les valeurs de :

$$R_4 = 100 \Omega, \quad R_3 = 813 \Omega, \quad C_4 = 117,834 \text{ nF}.$$

Les valeurs calculées de $\text{tg } \delta$ et C_x sont les suivantes :

$$C_x = C_n \frac{R_4}{R_3} = 1 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{100}{813} = 0,123 \cdot 10^{-9} \text{ F}.$$

$$C_x = 0,123 \text{ nF}.$$

$$\text{tg } \delta = \omega R_4 C_4 = 314 \cdot 100 \cdot 117,834 \cdot 10^{-9} = 3,7 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{tg } \delta = 0,0037 \approx 0,04.$$

L'erreur commise sur les résultats obtenus est donnée par la relation (3.16).

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \Delta \text{tg } \delta = \frac{J_{\delta}}{U \cdot \omega C_n} \left(1 + \frac{R_{\delta}}{R_4} + \frac{C_n}{C_x} \right),$$

où

$$J_g = 5 \cdot 10^{-10} \text{ A,}$$

$$R_4 = 100 \Omega .$$

$$R_g = 1000 \Omega ,$$

$$C_n = 1 \cdot 10^{-9} \text{ F.}$$

$$U = 220 \text{ V,}$$

$$C_x = 0,123 \cdot 10^{-9} \text{ F.}$$

$$w = 314 ,$$

Avec ces valeurs on a l'erreur :

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \Delta \operatorname{tg} \delta \approx 1,6 \cdot 10^{-4} .$$

comme on le constate l'erreur commise est très faible, ce qui nous donne des résultats avec une grande précision.

1) Modèle à essayer : plaque en plexiglass

Les dimensions de la plaque utilisée sont 60 x 60 x 0,2 cm.

L'état des surfaces sont lisses et propres.

Les électrodes sont en feuilles d'Aluminium, d'une épaisseur de 0,1 mm et d'un diamètre de 50 mm, la distance entre l'électrode protégée et l'anneau de garde est de 1 mm.

L'aspect général du modèle ainsi que sa représentation schématique sont donnés par les figures 4.5 et 4.6.

Comme adhésif on a utilisé des produits de pétrole - gazoil et cela en couches très fines régulièrement réparties.

L'estimation du courant dans la branche du modèle a été faite sur la base des valeurs générales de la permittivité relative ϵ_r du plexiglass qui est dans les limites de 3,5 à 4,5.

Pour notre système d'électrodes et pour $\epsilon_r = 4$;

La capacité approximative du modèle est donnée par la formule :

$$C_x = \epsilon \frac{S}{e}$$

ou S représente la surface de l'électrode,

e épaisseur de la plaque de plexiglass,

ϵ la permittivité absolue qui est donnée par la formule connue :

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Vers le pont
de Schéring

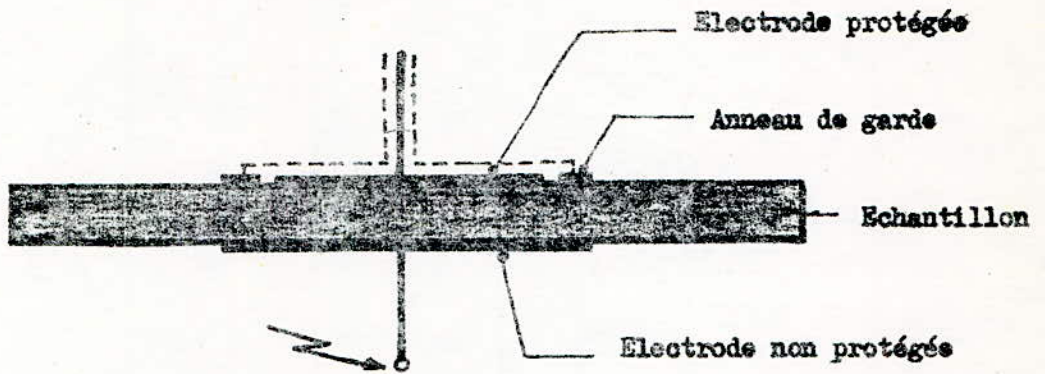


Fig. 4.5

Aspect général du modèle à essayer

- Plaque en plexiglass (60 x 60 x 0,2 cm).
- Electrode en Aluminium (D = 50 mm , e = 0,1 mm).

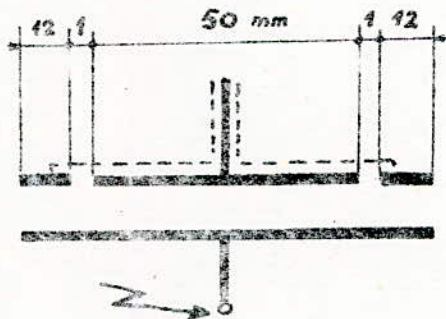


Fig. 4.6

Représentation schématique du modèle à essayer.

$$\text{ou } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_r = 4$$

la valeur calculée de C_x est :

$$C_x = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot \frac{(50 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot \frac{1}{2 \cdot 10^{-3}}$$

$$C_x = 0,035 \text{ nF.}$$

Pour la capacité C_x estimée et $U = 220 \text{ V}$, on obtient le courant J_x selon la formule (3.13) :

$$J_x \approx U \cdot w \cdot \epsilon_x = 220 \cdot 314 \cdot 0,035 \cdot 10^{-9} \approx 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ A.}$$

L'estimation de la capacité du condensateur étalon était fait comme dans le cas du modèle précédent à l'aide de nomographe de la page 3.7. Pour $U = 220 \text{ V}$ et $C_x \approx 0,035 \text{ nF}$, on a obtenu :

$$C_n = 0,035 \text{ nF.}$$

Mais comme on ne dispose pas d'un tel condensateur, nous avons choisi :

$$C_n = 1 \text{ nF,}$$

Pour les mêmes raisons que pour le modèle précédent.

Par la suite on a choisi R_3 et R_4 , on a obtenu :

$$R_3 = 1000 \ \Omega \quad \text{et} \quad R_4 = 35 \ \Omega.$$

Ainsi toutes les données du pont sont déterminées.

L'équilibre du pont est obtenu pour les valeurs de :

$$R_4 = 35 \ \Omega, \quad R_3 = 897,43 \ \Omega, \quad C_4 = 180,17 \text{ nF.}$$

Pour ces valeurs on obtient $\text{tg } \delta$ et C_x suivant les formules connues :

$$C_x = C_n \frac{R_4}{R_3} = 1 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{35}{897,43} = 0,039 \cdot 10^{-9} \text{ F.}$$

$$C_x = 0,039 \text{ nF.}$$

$$\text{tg } \delta = w R_4 C_4 = 314 \cdot 35 \cdot 180,17 \cdot 10^{-9} = 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{tg } \delta = 0,002.$$

L'erreur commise sur les résultats obtenus est donnée par la relation (3.16), avec les valeurs de J_g , R_g , U et w d'une part et de R_4 , C_n , C_x de l'autre part on a obtenue :

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \Delta \text{tg } \delta = 4,35 \cdot 10^{-4}.$$

Comme on le constate l'erreur est aussi négligeable, mais plus importante que celle commise sur le transformateur, cela est due en grande partie au choix de la capacité du condensateur étalon.

Le laboratoire de l'E.N.P.A. ne possède pas encore des condensateurs étalons de tension supérieures à 1 kV et de capacités variées, des cellules de mesure pour diélectriques solides et liquides ainsi que les différents accessoires servant aux variations de la température et de la pression.

Cela nous a empêché de procéder aux mesures plus complètes et plus variées, en fonction des différents paramètres comme p.ex. la tension de mesure, la température, la pression, la fréquence, le degré d'humidité ect....

- C O N C L U S I O N S -

Notre étude sur la définition de $tg \delta$ et C_X nous a permis d'élargir nos connaissances sur le comportement et les propriétés des matériaux isolants soumis à un champ alternatif.

L'étude théorique était limitée sur la caractérisation des pertes diélectriques par le facteur de dissipation $tg \delta$.

Ce qui nous a conduit aux conclusions suivantes :

- 1) Le facteur de dissipation $tg \delta$ est une mesure d'énergie déperdue dans un diélectrique et caractérise d'une manière générale son état.
- 2) La valeur de $tg \delta$ dépend de plusieurs facteurs, surtout de la valeur de la tension appliquée et de sa fréquence, de la température, de la pureté de l'isolation (humidité, inclusions gazeuses ...), du vieillissement ect....
- 3) Le contrôle et la surveillance des installations à haute tension nécessitent des laboratoires d'essais pour la mesure du $tg \delta$ et C_X , car cela nous permet de porter un jugement sur la qualité d'une isolation, afin de prévenir certains accidents catastrophiques.
- 4) Le choix des méthodes pour la mesure de $tg \delta$ et C_X , est fonction de la fréquence de mesure.

Pour les basses fréquences (40,50 et 60 Hz), où les pertes diélectriques intéressent spécialement la technique des hautes tensions, la détermination de $tg \delta$ et C_X se fait habituellement par la méthode classique et commode de SHERING.

5) Dans le laboratoire de l'E.N.P.A. nos recherches étaient limitées par la tension maximale des condensateurs étalons disponibles qui est de 1000 V, 50 Hz.

6) En ce qui concerne l'extension des mesures au laboratoire de l'E.N.P.A., les essais de $tg \delta$ et C_X peuvent être élargis considérablement, car un équipement très important existe déjà.

Nous nous permettons de suggérer l'équipement complémentaire tel que : des condensateurs étalons d'une tension de 100 KV qui seront appropriés à l'équipement existant au laboratoire de haute tension, des cellules de mesures pour les recherches expérimentales sur les diélectriques solides et liquides ainsi que des dispositifs donnant des conditions d'ambiance plus variées.

Et cela dans le but de pouvoir procéder à des recherches plus importantes et plus diversifiées.

- B I B L I O G R A P H I E -

- - - - -oooo - - - - -

- [1]. NORMES FRANCAISES (U.T.E.) C 26 - 230
" Méthodes recommandées pour la détermination de $tg \delta$ et C_x "
- [2]. PUBLICATION (C.E.I.) N° 250 - 1969
" Méthodes de mesure de $tg \delta$ et C_x "
- [3]. FALLOU, B. : Technique de l'Ingénieur, D. 214.
" Caractéristiques des matériaux isolants solides,
méthodes de mesure, valeurs et significations "
- [4]. D O B A R Z I G, M. : Cours E.N.P.A. " Technique de H.T. "
- [5]. VON HIPPEL, A, R. : " Les diélectriques et leurs applications ".
" L Dunod, Paris, 1961, p. 1 à 3, 78 à 92 et 117 à 123.
- [6]. TRITEX. AG " Catalogues "
- [7]. CIGRE. 1966, Tome II rapport N° 128.
- [8]. KUPFMULLER, K. : " Electricité théorique et appliquée ".
Dunod, Paris, 1959 P. 145 à 148.
- [9]. REVUE GENERALE DE L'ELECTRICITE.
" Phénomènes de polarisation dans les diélectriques ".
Tome, 86, n° 3, Mars 1977, p. 132 à 135.
- [10]. COUCHET, G. GELARD, J.
PHILIPPE, D. ZVENIGOROSKI, A. " Electricité générale ".
Masson, Paris, 1969, p. 252 à 305.

(Suite)

- [11]. MAUDUIT, A. : " Installations électriques à haute et base tension ".
Tome I et II, Dunod, Paris, 1964, p. 56 à 64.
- [12]. GALLO, A, Ph. : " Thèse de doctorat ".Alger, 1970.
" Mise en évidence d'instabilités thermiques dans un
diélectrique polaire soumis à une tension alternative ".
- [13]. PELISSIER, R. : " Réseaux électriques ".
Tome II, Masson , Paris, 1970, p. 160 à 170.
- [14]. KOSTENKO, M. PIOTROVSKI, L. " Machines Electriques ".
Tome II, Edition de MOSCOU, 1970, p. 136 à 144.
- [15]. FOUILLE, A. : " Principes généraux ".
Tome I, FOUCHER, , 1960, p. 72 à 75.
-