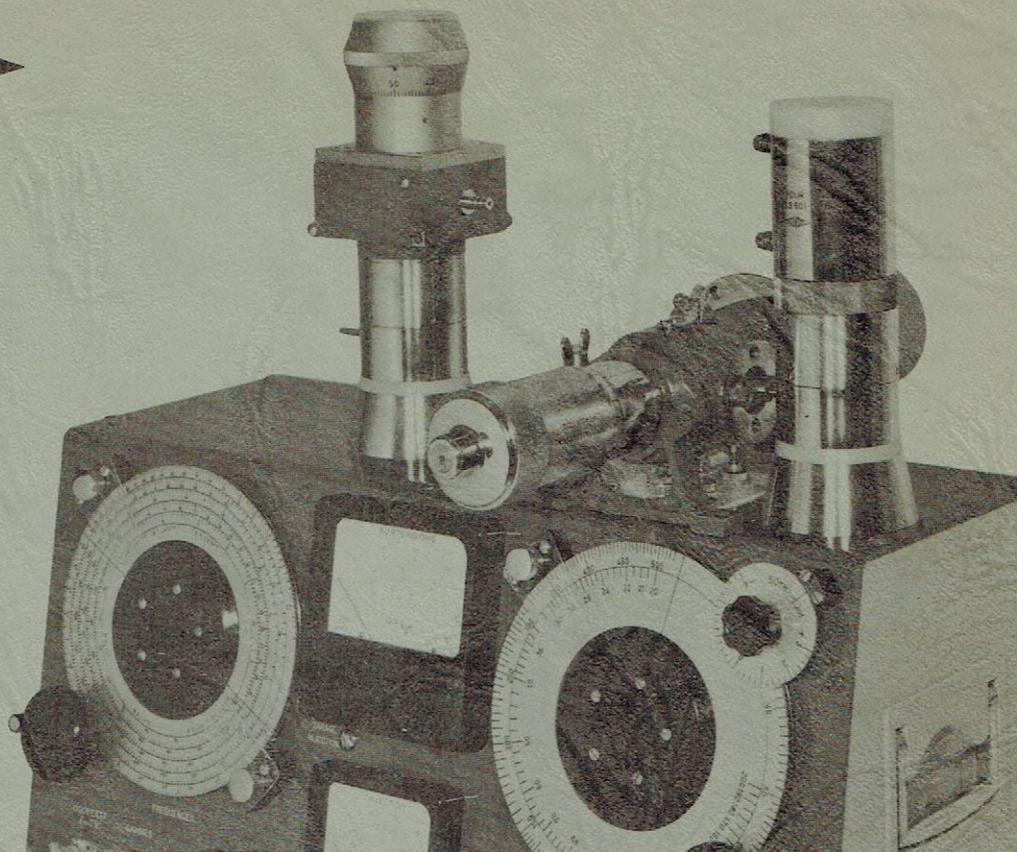
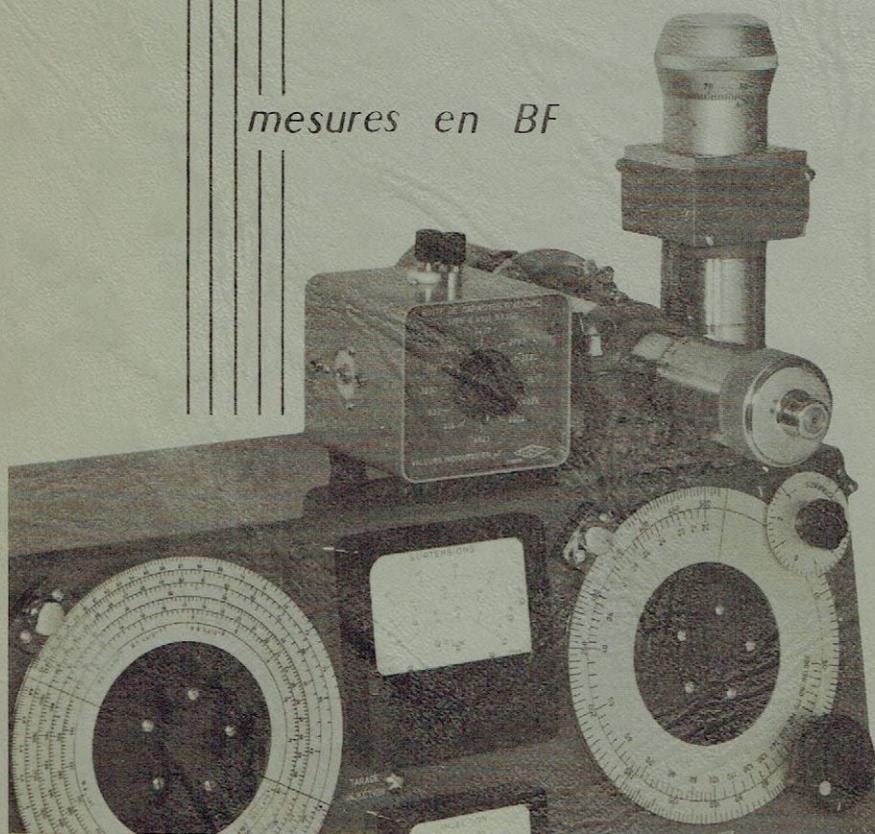




mesures en HF



mesures en BF



mesures de $\text{tg} \delta$ et k

(pertes diélectriques et
permittivité relative ϵ)



DOSSIER TECHNIQUE

MESURE
DU POUVOIR INDUCTEUR SPECIFIQUE
ET DES PERTES DIELECTRIQUES
EN HAUTE FREQUENCE
ET EN BASSE FREQUENCE

18, Avenue P.-Vaillant-Couturier
78 - TRAPPES - France

Adresse Télégraphique : FERI-TRAPPES

~~tél: 923 00 00~~ * - télex: 25 705

tél: 462-88-88 (lignes groupées)

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I

PRATIQUE DES MESURES

METHODE GENERALE - APPAREILLAGE NECESSAIRE - LE Q.METRE	1
NECESSITE D'UN APPAREILLAGE AUXILIAIRE	1
APPAREILLAGE DE MESURES A UTILISER	2
I - PRINCIPE DE LA MESURE	2
II - CELLULES UTILISEES	3
II - 1 - Cellule à liquides type CS 601	3
II - 2 - Cellule à solides type CS 701	3
III - ROLE DU CONDENSATEUR MICROMETRIQUE	5
IV - PREPARATION DES ECHANTILLONS	5
IV - 1 - Cas des liquides	5
IV - 2 - Cas des solides en plaques	6
V - CONDITIONNEMENT DES EPROUVETTES	6
V - 1 - Séjour en étuve	6
V - 2 - Nombre des éprouvettes	6
VI - INFLUENCE DE LA FREQUENCE	7
VII - INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DU DEGRE HYGROMETRIQUE	7

MESURES EN HAUTE FREQUENCE

MODE OPERATOIRE

I - MISE EN PLACE DE L'APPAREILLAGE AUXILIAIRE	7
II - CONDUITE DES MESURES	10
II - 1 - Opération préliminaire	10
II - 2 - Cellule à liquides type CS 601	10
a) étendue des mesures	
b) contrôle de la température du liquide	
c) résistance à la corrosion	
d) facilité de démontage et de nettoyage	
e) élimination des causes d'erreur et facilité d'emploi	
f) utilisation	
II - 3 - Cellule à solides type CS 701	16
a) réglage de l'écartement des plateaux	
b) lecture des échelles	
c) méthode de mesure	
d) détermination de C_a	
e) mesure sur des produits pâteux	
f) influence des lames d'air	

EXEMPLES PRATIQUES DE MESURES

MESURES SUR DES LIQUIDES	22
MESURES SUR DES SOLIDES	23

MESURES EN BASSE FREQUENCE

MODE OPERATOIRE	
a) DETERMINATION DE Γ	28
b) CONDUITE DES MESURES	28
EXEMPLES PRATIQUES DE MESURES	
MESURES SUR DES LIQUIDES	31
MESURES SUR DES SOLIDES	32

CHAPITRE II

RAPPEL THEORIQUE

I - DEFINITIONS	37
I - 1 - CONDENSATEUR A INFLUENCE TOTALE	37
I - 2 - CAPACITE ET CONSTANTE DIELECTRIQUE	37
I - 3 - CAPACITE ACTIVE D'UNE CELLULE DE MESURE	38
I - 4 - CHARGES LIBRES ET CHARGES LIEES	39
II - COMPORTEMENT D'UN DIELECTRIQUE EN HAUTE FREQUENCE	40
II - 1 - DEFINITION DE $tg\delta$	40
II - 2 - SIGNIFICATION DE $tg\delta$	41
II - 3 - CAS DES PERTES ELEVEES	42
II - 4 - VARIATION AVEC LA FREQUENCE DE k' , k'' et $tg\delta$	42
III - MESURES DE k' , k'' et $tg\delta$	43
III - 1 - PRINCIPE	43
III - 2 - METHODE DU Q.METRE	44
III - 3 - NECESSITE D'UN APPAREILLAGE AUXILIAIRE	45
ANNEXE 1	
NOTATIONS ET SYMBOLES UTILISES	47
ANNEXE 2	
TABLE DES CONSTANTES DIELECTRIQUES DES PRINCIPAUX ISOLANTS USUELS	49
P.J. FEUILLES DE MESURES REPRODUCTIBLES	

CHAPITRE I

PRATIQUE DES MESURES

INTRODUCTION

Après avoir décrit l'appareillage de mesures et les méthodes à utiliser pour évaluer quantitativement les pertes diélectriques des isolants solides ou liquides, nous rappelons brièvement quelques définitions fondamentales relatives aux coefficients diélectriques.

De nombreux exemples pratiques ainsi que des feuilles de mesures reproductibles permettront une utilisation rationnelle de l'appareillage décrit.

METHODE GENERALE - APPAREILLAGE NECESSAIRE - LE Q.METRE

La détermination pratique de l'angle de pertes et de la constante diélectrique d'un isolant en haute fréquence, peut se ramener à une mesure de capacité. Mais cette mesure doit pouvoir être effectuée dans une plage étendue de fréquences, puisque les paramètres caractéristiques d'un échantillon " $\text{tg}\delta$ " et " k " varient eux-mêmes bien souvent en fonction de la fréquence.

Dans la méthode de mesure décrite ci-après, on utilise comme élément de base le Q.Mètre, appareil familier à tous les techniciens des mesures en haute fréquence.

Cet appareil comporte essentiellement un oscillateur à fréquence variable et un circuit résonnant série, dont les éléments L et C sont également variables. Le Q.Mètre est donc particulièrement bien adapté aux mesures de capacité en haute fréquence, par la méthode de substitution. En outre, l'extension des mesures jusqu'au domaine des **basses fréquences**, 800 Hz environ, est rendu possible par utilisation d'un oscillateur B.F. extérieur venant se substituer à l'oscillateur du Q.Mètre.

NECESSITE D'UN APPAREILLAGE AUXILIAIRE

Cependant, pour la mesure d'angles de pertes relativement faibles, à des fréquences supérieures à quelques centaines de kHz, l'influence de la fréquence sur la valeur des éléments L et C du circuit de mesures, devient particulièrement gênante. Il est donc nécessaire, d'associer au Q.Mètre un appareillage auxiliaire qui permettra de modifier la méthode de mesure, de façon à éliminer l'influence des éléments réactifs.

APPAREILLAGE DE MESURES A UTILISER

L'appareillage de mesures comprend, outre le Q.Mètre et son Jeu de 14 bobines étalonnées type M 621 B :

- un condensateur micrométrique, type EM 202 A
- deux cellules de mesures :
 - type CS 601 pour les diélectriques liquides
 - type CS 701 pour les diélectriques solides.

En outre, pour les mesures en basse fréquence, il est prévu :

- un jeu de 4 bobines d'accord B.F. type MA 101 (800 Hz à 50 kHz)
- une boîte de capacités d'accord type EA 101 (400 pF à 4800 pF)
- éventuellement : un transformateur d'adaptation type MT 101
ou un amplificateur B.F. type CA 301

Cet appareillage est décrit dans les notices EM 202 A, CS 601, CS 701, CA 301, EA 101 et MA 101 du catalogue général. L'objet de la présente notice est de préciser le mode opératoire, d'abord pour les mesures en **haute fréquence**, puis pour les mesures en **basse fréquence**.

I - PRINCIPE DE LA MESURE

La cellule de mesure constitue un condensateur que l'on place en parallèle sur le condensateur variable du Q.Mètre. Une bobine du jeu étalonné permet de constituer ainsi un circuit résonnant série.

Si à une fréquence f , on mesure successivement le coefficient de surtension et la capacité d'accord de ce circuit, d'abord sans diélectrique dans la cellule, puis avec le diélectrique étudié, les valeurs Q_0 et Q , C_0 et C ainsi mesurées seront différentes. *

On déduira de ces mesures les valeurs de l'angle de pertes et du pouvoir inducteur spécifique de l'échantillon considéré.

Les formules à appliquer sont :

- Pour le pouvoir inducteur spécifique :

$$k = 1 + \frac{C_0 - C}{C_a} \quad (1)$$

- Pour l'angle de pertes :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \cdot \frac{1}{Q_0 \cdot Q} \cdot \frac{Q_0 - Q}{C_0 - C + C_a} \quad (2)$$

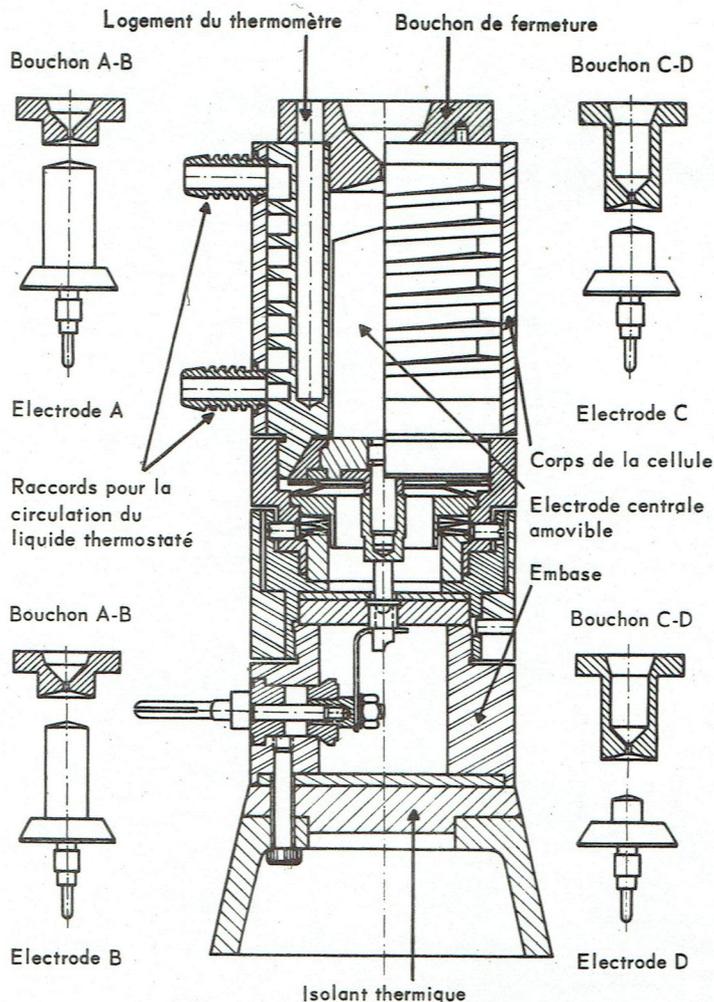
Dans ces formules :

- f = fréquence à laquelle la mesure est effectuée
- L = inductance de la bobine du jeu M 621 B utilisée
- C_a = capacité active de la cellule de mesure (se reporter à la partie théorique pour la définition de C_a).

* Les notations et symboles communs à ce volume sont définis à l'annexe 1, page 47.

II - CELLULES UTILISEES

II - 1 - CELLULE A LIQUIDES TYPE CS 601



Cellule CS 601 avec ses 4 électrodes et les bouchons correspondants.

la plupart des liquides corrosifs dont la mesure des constantes diélectriques présente de l'intérêt. Son coefficient de dilatation très faible permet des mesures dans une large plage de température.

II - 2 - CELLULE A SOLIDES TYPE CS 701

Cette cellule sera utilisée pour les diélectriques solides. Elle constitue un condensateur plan dont un des plateaux est à montage oscillant. Ce dispositif original permet d'éliminer les erreurs introduites lorsque les faces de l'échantillon ne sont pas rigoureusement parallèles. Les plateaux ont un diamètre de 50 mm et une surface de 14,62 cm².

L'isolement de l'électrode inférieure est assuré par une pièce en Kel-F. La tension de claquage est supérieure à 5 000 V en continu et supérieure à 2 000 V en alternatif pour un écartement des plateaux de 2 mm. Le déplacement de l'électrode supérieure est obtenu par une vis micrométrique. Un système de démultiplication associé à un profil particulier assure une manipulation aisée. On peut ainsi connaître la distance entre les électrodes à ± 0,01 mm près. La reproductibilité des mesures est excellente grâce au système de débrayage de la commande de la vis micrométrique.

Cette cellule conviendra pour l'étude des diélectriques liquides, dont la conductivité est relativement faible. Elle constitue un condensateur cylindrique du type à influence totale, de capacité active :

35 pF, 10 pF, 5 pF ou 1 pF

selon le type d'électrode utilisé. Cette valeur s'entend pour la cellule remplie entièrement de liquide, c'est-à-dire de 10 à 20 cm³ suivant le type d'électrode utilisé.

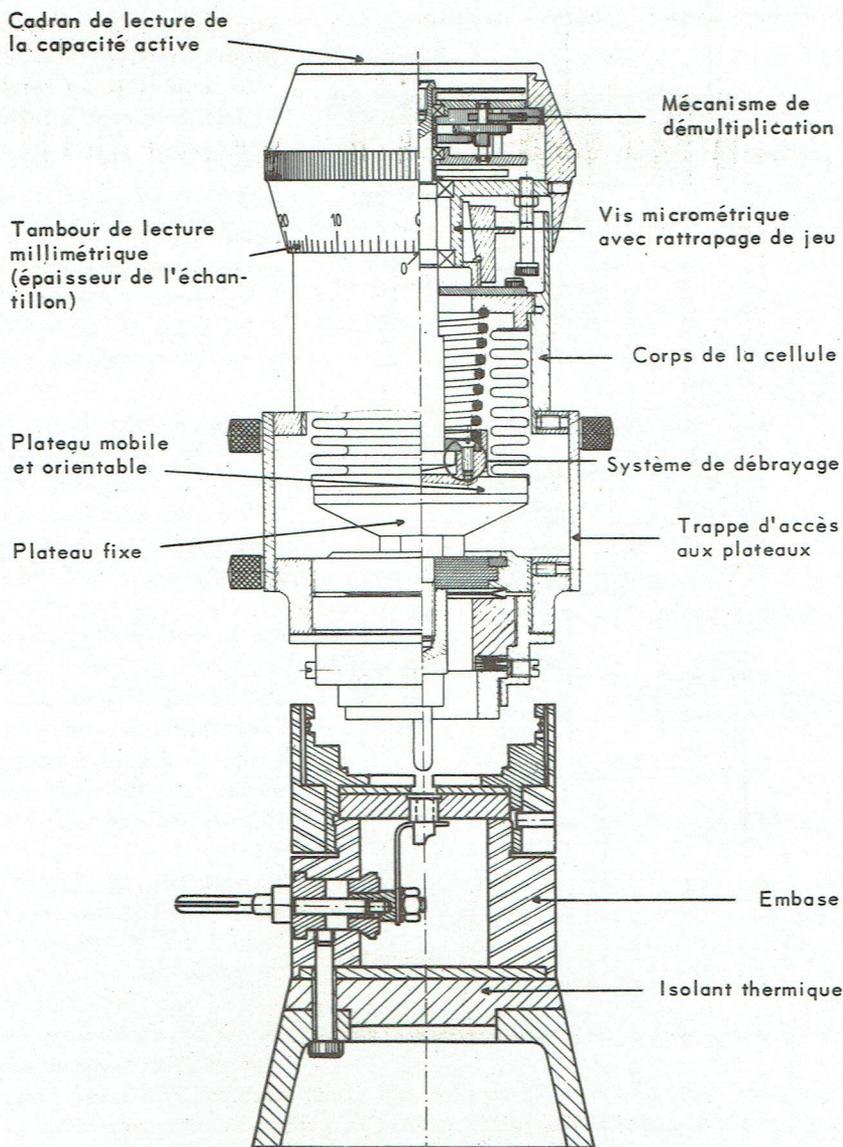
On pourra mesurer avec cette cellule des liquides dont le pouvoir inducteur spécifique (constante diélectrique) est compris entre 1 et 80 c'est-à-dire la plupart des liquides isolants organiques et minéraux.

La précision des mesures, compte tenu des diverses causes d'erreur, est de ± 2 % dans les cas les plus favorables. Mais une précision beaucoup plus grande peut être obtenue au moyen d'un mode opératoire particulier indiqué page 10.

La cellule type CS 601 est isolée sur " Kel-F ". Sa résistance d'isolement est de l'ordre de 1 million de mégohms.

Sa construction en acier inoxydable type NS22S la rend inattaquable à

En outre, la **capacité active** C_a de cette cellule dépend du diamètre et de l'épaisseur de l'échantillon. Un cadran gradué indique directement cette valeur pour un diamètre de 50 mm en fonction de l'épaisseur de l'échantillon. Pour les échantillons de diamètre inférieur, une formule simple permet de faire la correction de C_a .



Vue en coupe de la cellule type CS 701 et de son support.

On utilise également cette cellule pour les produits géométriquement mal définis, tels que les **produits pâteux** (trop visqueux pour être introduits dans une cellule à liquides), qui seront placés dans une coupelle (fournie avec chaque cellule). Cette coupelle sera introduite facilement entre les plateaux.

Toutefois, ce dispositif ne sera pratique que pour des mesures comparatives (évolution de produits au cours de mise au point, vérification de lots de fabrication, etc...). En effet, le volume cylindrique constituant la coupelle est limité par des parois en matière plastique et il n'est pas possible d'utiliser directement les courbes d'étalonnage de la cellule. Lorsque l'on désirera effectuer une mesure en valeur absolue, il faudra suivre le mode opératoire indiqué dans la présente notice, page 20.

III - ROLE DU CONDENSATEUR MICROMETRIQUE

Le condensateur micrométrique permet de réaliser les petites variations étalonnées de capacité nécessaires pour la mesure.

L'isolement est réalisé par une couronne de trolitul, la résistance d'isolement est supérieure à 10^6 mégohms.

Chaque division de la partie mobile du condensateur cylindrique correspond à une variation de capacité de 0,01 pF, soit 1 pF pour 100 Δ .

La variation totale utile de capacité est de l'ordre de 80 pF et la linéarité de variation est assurée avec une précision meilleure en général, que 5 %.

Il sera donc toujours possible de déterminer exactement le sommet de la courbe de résonance, quelle que soit la valeur de l'angle de pertes et du pouvoir inducteur spécifique de l'échantillon, sauf pour les corps très absorbants dont les pertes élargissent tellement la courbe de résonance que le pointé de son sommet devient impossible d'une manière précise. On utilisera de préférence, dans ce cas, le mode opératoire décrit au paragraphe " Cas des angles de pertes élevées ", page 9.

En outre, le condensateur micrométrique a une inductance série constante et pratiquement négligeable. Les variations de capacité d'accord entre la mesure avec l'échantillon et la mesure sans l'échantillon, seront donc pratiquement réalisées en laissant fixe le CV de mesures du Q.Mètre et en faisant varier uniquement la valeur du condensateur micrométrique placé en parallèle.

Enfin, le condensateur micrométrique constitue le point central du montage de mesures, sur lequel viendront se fixer les autres éléments.

Il est possible, de cette façon, de réaliser tous les contacts de masse des différents circuits sur une borne commune, et d'obtenir des connexions aussi courtes et rigides que possibles.

Nota - Limitation dans les mesures

L'utilisation du condensateur micrométrique limite à 80 pF environ, la variation de capacité possible (avec et sans l'échantillon). Si le pouvoir inducteur spécifique du diélectrique étudié est assez élevé, on pourra être amené de ce fait à diminuer la surface de l'échantillon, ou à augmenter son épaisseur.

IV - PREPARATION DES ECHANTILLONS

IV - 1 - CAS DES LIQUIDES

On tiendra compte du fait que la constante diélectrique est très sensible à la pureté des produits essayés. On nettoiera soigneusement la cellule CS 601 avant chaque mesure et surtout si l'on change de liquide. La construction de la cellule CS 601 rend son démontage particulièrement facile. *On ne se contentera donc pas de la sécher à l'air chaud sans la démonter.*

Il faut verser dans la cellule 10 à 20 cm³ de liquide. Replacer le bouchon. Un peu de liquide doit remonter dans la partie élargie du trou central où elle constitue une réserve. Celle-ci est nécessaire dans le cas de produits volatils ou de mesures en fonction de la température. On reste ainsi assuré du volume exact de liquide échantillonné.

IV - 2 - CAS DES SOLIDES EN PLAQUES

Pour assurer l'uniformité la plus grande possible du champ électrique dans le diélectrique, on utilise des échantillons de forme circulaire de faible épaisseur (2 à 7 mm) et dont le diamètre sera celui des plateaux de la cellule ($\phi = 50$ mm).

Néanmoins, un échantillon d'un diamètre inférieur à 50 mm peut être utilisé ; il suffit dans ce cas de corriger la valeur de la capacité active C_a indiquée sur le cadran.

$$C_{a \text{ (réelle)}} = C_{a \text{ (lue)}} \times \frac{d^2}{2500}$$

Pour l'épaisseur, on se reportera aux courbes d'étalonnage afin d'obtenir une valeur de la capacité active de la cellule telle que :

$$(k - 1) C_a < 80 \text{ pF}$$

k étant la valeur présumée de la constante diélectrique.

Avant de procéder à l'usinage précis des échantillons définitifs, il sera bon de faire un essai préliminaire. S'il s'avérait impossible, après introduction de l'échantillon, de retrouver la résonance en diminuant la capacité du condensateur micrométrique, il faudrait augmenter son épaisseur.

Pour éviter l'influence des lames d'air, corrigées automatiquement dans une certaine mesure, les faces des échantillons définitifs devront être bien parallèles et parfaitement dressées.

V - CONDITIONNEMENT DES EPROUVETTES

V - 1 - SEJOUR EN ETUVE

Suivant le projet de Normalisation du Centre d'Etudes des Matières Plastiques et sauf indications contraires, les éprouvettes sont conditionnées comme suit :

Elles sont laissées pendant 4 jours dans une enceinte à 80 % d'humidité (une solution sursaturée de sulfate d'ammoniac donne un degré hygrométrique de $81 \pm 0,1$ entre 15° et 30°C) et à une température voisine de l'ambiante (entre 15° et 30°C).

Cette enceinte doit être de dimensions suffisantes pour que le prélèvement rapide des éprouvettes n'entraîne pas de perturbations sensibles de l'état de celles qui y restent placées. L'essai est effectué immédiatement après le prélèvement de chaque éprouvette dans l'enceinte.

V - 2 - NOMBRE DES EPROUVETTES

Il sera nécessaire d'utiliser au moins 3 éprouvettes et de préférence 5 éprouvettes, en faisant 2 fois la mesure sur chacune d'elles, après nouveau séjour d'une durée suffisante, en fonction de la nature du produit, dans l'enceinte hygrométrique entre les deux mesures.

NOTA - La cellule pour solides type CS 701 pourra éventuellement être placée en étuve et reliée au Q.Mètre par un câble coaxial fourni avec chaque cellule. Toutefois, pour conserver au dispositif " palmer " sa précision d'origine, il est conseillé de ne pas dépasser une température de 100°C .

D'autre part, si la nature du produit l'exige, il sera possible également

de maintenir l'enceinte de la cellule en légère surpression. En effet, un ajustage est prévu pour l'arrivée d'un gaz desséchant (azote ou CO_2).

VI - INFLUENCE DE LA FREQUENCE

Les valeurs de la tangente de l'angle de pertes et de la constante diélectrique sont, dans la plupart des cas, influencées par la fréquence (voir page 40).

D'autre part, les cellules CS 601 et CS 701 ont été conçues pour être utilisées dans la gamme de fréquence relativement basse ($f < 5$ MHz), où la mesure de la constante diélectrique présente le plus d'intérêt pour l'industrie chimique.

Les courbes d'étalonnage des cellules sont valables pour la fréquence (normalisée pour les mesures diélectriques) de 1 MHz et pour toutes les fréquences inférieures.

Pour des fréquences supérieures à 5 MHz, l'inductance parasite des connexions " chaudes " commence à introduire des erreurs. On ne cherchera donc pas à faire des mesures absolues au-delà de 5 MHz. Mais, il est parfaitement possible d'effectuer des mesures comparatives entre des produits similaires jusqu'à environ 25 MHz (contrôle de fabrication par exemple).

VII - INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DU DEGRE HYGROMETRIQUE

Pour certains produits, la constante diélectrique " k " et " $\text{tg}\delta$ " peuvent varier avec la température.

Par exemple, pour le benzène :

$$k = 2,286 \text{ à } 20^\circ\text{C}$$

$$k = 2,277 \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

Si on constate des non-reproductibilités au cours d'une série de mesures, on commencera donc en premier lieu, par s'assurer que la température à laquelle on opère, ne s'est pas modifiée.

L'humidité amène généralement une augmentation des valeurs de la tangente de l'angle de pertes et de la constante diélectrique :

Influence de l'humidité sur les pertes par conductivité superficielle

On notera aussi que l'humidité, en se déposant sur les bords latéraux de l'échantillon parallèles aux lignes de force du champ électrique, peut donner lieu à des pertes par conductivité superficielle et introduire des erreurs de mesures sur la valeur de $\text{tg}\delta$. Il peut donc être nécessaire de placer l'échantillon dans une enceinte contenant un gaz desséchant.

MESURES EN HAUTE FREQUENCE ($f > 50$ kHz)

MODE OPERATOIRE

I - MISE EN PLACE DE L'APPAREILLAGE AUXILIAIRE

On verra plus loin, au paragraphe " Conduite des mesures ", qu'il est préférable d'effectuer tout d'abord une mesure avec une bobine étalonnée seule (correspondant à la fréquence choisie), avant installation de l'appareillage auxiliaire sur le Q.Mètre.

MONTAGE DU CONDENSATEUR MICROMÉTRIQUE POUR LES MESURES EN HF

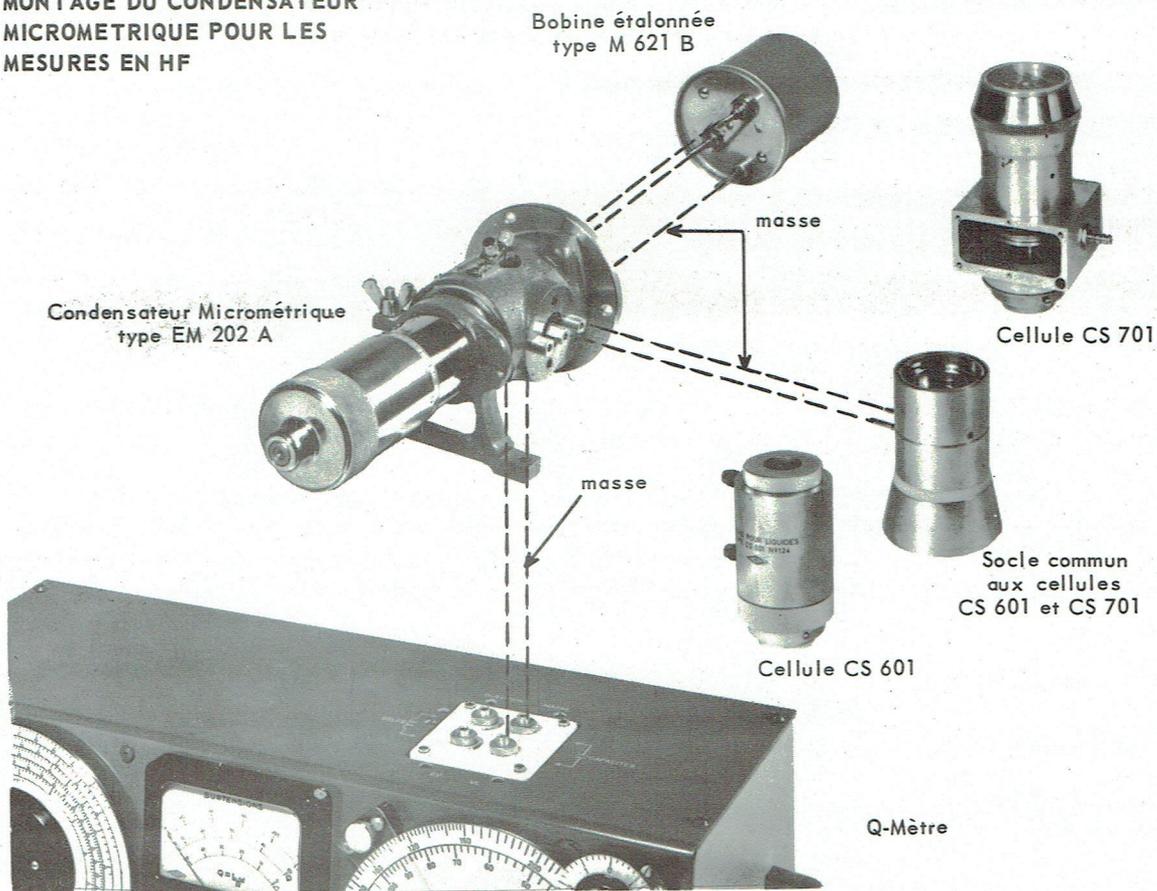


Figure 1

On placera ensuite cet appareillage de la façon suivante :

- 1°) La grande barrette coudée (B_1), (livrée avec le condensateur micrométrique, ainsi qu'une petite barrette avec fiche et une entretoise filetée), sera fixée sur la borne " Injection " du Q.Mètre.
- 2°) L'entretoise filetée (E), sera vissée dans le stator du condensateur micrométrique sur la face avant.
- 3°) La petite barrette coudée (B_2), munie d'une fiche spéciale avec doigt de contact, sera enfoncée dans la vis creuse également prévue sur la face avant du condensateur micrométrique.
- 4°) Le condensateur micrométrique étant ensuite placé sur les bornes " Capacité " du Q.Mètre, il sera possible de fixer alors la bobine étalonnée correspondant à la fréquence de l'essai sur la face avant du condensateur micrométrique. La configuration géométrique du système de barrettes et entretoises fixées maintenant sur la face avant du condensateur, reproduit en effet la disposition des fiches de la bobine.
- 5°) On connectera ensuite la cellule de mesures, à droite du condensateur micrométrique, en veillant à ce que les fiches mâles correspondant aux points " chauds " soient bien connectées dans les parties femelles correspondantes de celui-ci.

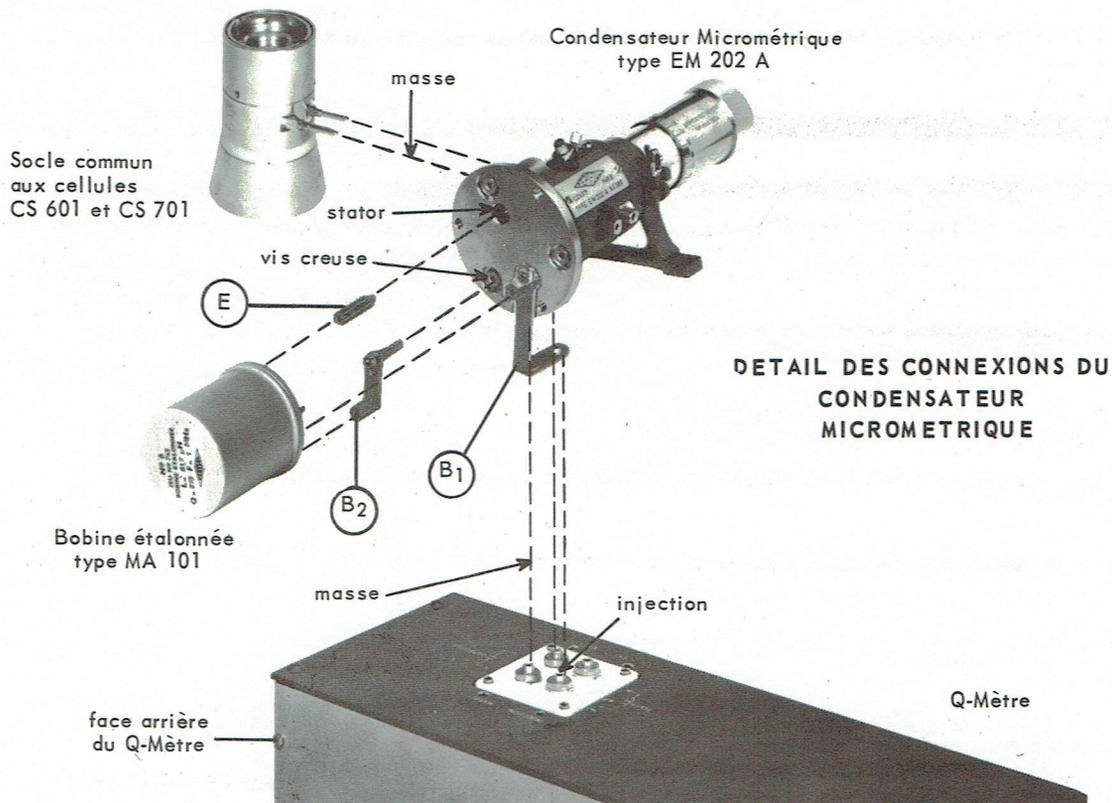


Figure 2

Cas des angles de pertes élevés

Lorsqu'on effectue des mesures sur des échantillons dont l'angle de pertes est relativement élevé, $\text{tg}\delta$ de l'ordre de 1.10 par exemple, le ΔQ est alors lu directement sur l'échelle de surtension du Q.Mètre.

Dans le cas des angles de pertes élevés, il devient en général difficile de déterminer la valeur de la capacité qui correspond à la résonance, le condensateur micrométrique variant beaucoup pour un déplacement inappréciable de l'aiguille du voltmètre de surtension.

Il est alors recommandé de procéder de la manière suivante :

- 1°) Régler approximativement le condensateur micrométrique pour obtenir la résonance.
- 2°) Placer l'aiguille du voltmètre de surtension, échelle ΔQ , sur " 0 " à l'aide des réglages GROS et FIN.
- 3°) Tourner le condensateur micrométrique jusqu'à ce que l'aiguille du voltmètre de crête soit sur la division " 50 "
- 4°) Lire la valeur C_1 du condensateur micrométrique qui correspond à ce réglage. La précision sur la détermination de C , sera en général acceptable.
- 5°) Tourner en sens inverse le condensateur micrométrique jusqu'à retrouver la résonance ($\Delta Q = 0$) et continuer à le tourner dans le même sens jusqu'à ce que l'aiguille du voltmètre de surtension soit à nouveau sur la division " 50 ".
- 6°) Lire la valeur C_2 du condensateur micrométrique.

7°) La valeur de la capacité à la résonance est la moyenne des 2 valeurs

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2}$$

Ce mode opératoire permet d'obtenir une meilleure précision pour la détermination de " k " que le mode de pointage direct.

II - CONDUITE DES MESURES

II - 1 - OPERATION PRELIMINAIRE

A) La première opération a pour but d'éviter à l'opérateur le calcul du coefficient

$$\Gamma = \frac{1}{4 \pi^2 f^2 L}$$

de la formule (2) page 2.

- 1°) Régler l'oscillateur du Q.Mètre sur la fréquence " f " choisie pour la mesure.
- 2°) A l'exclusion de tout autre appareillage auxiliaire, placer une bobine étalonnée du Jeu M 621 B choisie pour obtenir la résonance pour une valeur Γ du condensateur de mesure comprise entre 250 pF et 500 pF environ.
- 3°) Chercher la résonance et lire la valeur Γ sur le cadran du CV du Q.Mètre. On a alors :

$$\frac{1}{4 \pi^2 f^2 L} = \Gamma$$

et la formule à appliquer pour calculer $\text{tg} \delta$ devient :

$$\text{tg} \delta = \frac{\Gamma}{Q_0 \cdot Q} \cdot \frac{Q_0 - Q}{C_0 - C + C_a} \quad (3)$$

Dans cette formule, toutes les capacités seront exprimées en picofarads.

B) Mettre en place l'appareillage auxiliaire, comme indiqué aux pages 7, 8 et 9. Régler le condensateur micrométrique au maximum de sa capacité $\Delta = 0$.

Il faut ensuite distinguer deux cas.

II - 2 - CELLULE A LIQUIDES TYPE CS 601

La cellule à liquides type CS 601 employée conjointement avec le Q.Mètre type M 803 A et ses accessoires, permet des mesures de grande précision de la constante diélectrique et de l'angle de perte des diélectriques liquides. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

a) Etendue des mesures

La cellule CS 601 est livrée avec quatre électrodes centrales interchangeables qui permettent

de mesurer des liquides dont la constante diélectrique est comprise entre 1 et 80 en quatre gammes dont les limites supérieures sont :

$$k = 3,3 \text{ avec l'électrode A}$$

$$k = 9 \text{ avec l'électrode B}$$

$$k = 17 \text{ avec l'électrode C}$$

$$k = 80 \text{ avec l'électrode D}$$

Il est donc possible d'effectuer des mesures sur pratiquement tous les liquides isolants.

Pour toutes les électrodes, la gamme de $\text{tg}\delta$ mesurable est celle du Q.Mètre, c'est-à-dire de 10^{-4} à 10^{-1} .

b) Contrôle de la température du liquide

Le corps de la cellule est pourvu d'un canal hélicoïdal dans lequel il est possible de faire circuler un liquide. On peut le maintenir à température constante au moyen d'une circulation à thermostat dont l'industrie offre de nombreux modèles. Des ajutages sont prévus pour le raccord des tuyaux.

On a ainsi la possibilité, soit d'effectuer des mesures à température constante, soit d'étudier l'évolution de la constante diélectrique et de l'angle de pertes d'un liquide en fonction de la température.

La gamme des températures couvertes ne dépend que de la circulation dont on dispose et peut pratiquement s'étendre de -40°C à $+100^{\circ}\text{C}$. Un logement est prévu dans le corps de la cellule pour un thermomètre de contrôle. L'embase de la cellule isole thermiquement celle-ci du reste de l'appareillage de mesures diélectriques.

c) Résistance à la corrosion

La cellule CS 601 est entièrement construite en acier inoxydable NS22S. L'isolement de l'électrode centrale est en Kel-F. La résistance à la corrosion de l'acier est excellente. Il résiste aux principaux acides et d'autre part son coefficient de dilatation est très faible :

$$\eta = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ entre } 20^{\circ} \text{ et } 100^{\circ}\text{C}$$

$$\eta = 17,6 \cdot 10^{-6} \text{ entre } 20^{\circ} \text{ et } 200^{\circ}\text{C}$$

ce qui permet les mesures dans une large plage de température.

d) Facilité de démontage et de nettoyage

La cellule CS 601 se démonte entièrement par simple dévissage de sa partie inférieure. Cette facilité permet un nettoyage simple et efficace. Ceci est très important lorsque l'on désire étudier des liquides visqueux tels que des huiles pour transformateurs, vernis à polymérisation rapide par exemple. De plus, les mesures diélectriques demandent pour être précises une propreté rigoureuse de la cellule.

e) Elimination des causes d'erreur et facilité d'emploi

La cellule CS 601 fonctionne sur le principe du condensateur à influence totale. Elle est entièrement pleine du liquide à mesurer.

- Pas de niveau de liquide à ajuster : ce qui facilite l'emploi de la cellule et élimine les erreurs dues au ménisque et à la réfraction des lignes de forces.

- Réserve de liquide constituée dans le bouchon de cellule : ce qui élimine les erreurs dues à l'évaporation.
- Quantité de liquide inférieure à 20 cm³. Elle est livrée à cet effet avec deux bouchons de fermeture en acier inoxydable de dimensions différentes.

f) Utilisation

1°) Montage et démontage de la cellule

La cellule se compose de quatre pièces principales (voir la coupe de la cellule, page 3).

- le corps de la cellule
- l'électrode centrale
- la partie inférieure
- le bouchon de fermeture

Avant de procéder au montage, il faut nettoyer soigneusement toutes les pièces en portant surtout son attention sur les parties qui seront en contact avec le liquide à mesurer. On terminera toujours le nettoyage avec un solvant non polaire comme le benzène par exemple.

On veillera soigneusement au cours du nettoyage à ne pas rayer les parties coniques rectifiées qui assurent le contact entre le corps de la cellule et l'électrode centrale et dont dépend l'étanchéité de la cellule.

Pour monter la cellule

- Prendre le corps de la cellule (1) la partie conique au dessus.
- Commencer par placer l'électrode centrale (2) choisie pour les mesures dans le corps de la cellule en faisant coïncider les repères tracés sur ces deux pièces. Veiller soigneusement à ce qu'aucun grain de poussière ne soit emprisonné entre les deux parties coniques.
- Placer la rondelle plate (3), la partie décollée du côté de l'électrode centrale. Son rôle est d'éviter que la rondelle élastique de serrage raye la base de l'électrode centrale.
- Visser ensuite à fond la partie inférieure (4) de la cellule sur le corps de cellule.

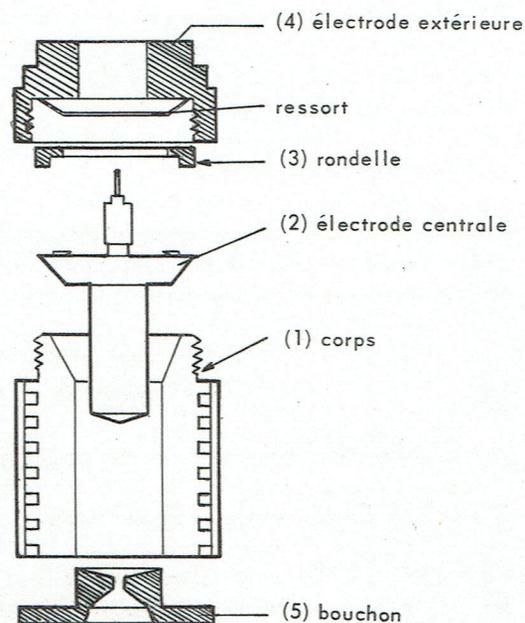


Figure 3

Remarque - On trouvera dans le coffret de la cellule une bague dont le rôle est d'assurer le centrage de la grande électrode centrale A, au cours de son montage. Pour monter cette électrode, opérer comme il est indiqué plus haut, mais avant de serrer à fond la partie inférieure (4) de la cellule introduire la bague de centrage par le haut du corps de cellule, si la partie lisse ne peut pas s'enfoncer complètement, dévisser un peu la partie inférieure, puis visser à fond et retirer la bague de centrage.

Il n'est pas prévu de bague de centrage pour les autres électrodes, leur diamètre plus faible rendant le centrage moins critique.

- Placer ensuite la cellule sur son embase et la tourner jusqu'à blocage des ergots sur les rampes héliodiales du raccord.

Les connexions de sortie latérales de l'embase s'enfichent dans les douilles du condensateur micrométrique comme il est indiqué dans le mode opératoire, page 7 § 1.

La cellule étant en place sur le Q.Mètre, placer le bouchon de fermeture (5), le tourner jusqu'à ce que l'ergot de positionnement s'engage dans le logement correspondant du corps de la cellule.

ATTENTION - *La cellule est livrée avec deux types de bouchons : le plus petit repéré A-B est prévu pour être utilisé avec les électrodes centrales A et B, le plus grand, C-D- doit être utilisé avec les électrodes C et D.*

Lorsque l'on utilise les électrodes A et B, il n'est pas possible de se tromper de bouchon, mais on peut par contre placer par erreur le petit bouchon A-B au-dessus de l'électrode C ou de l'électrode D. Lorsque l'on commet cette erreur, la capacité active de la cellule n'est plus celle indiquée dans le paragraphe 3^o), page 15 et les mesures effectuées dans ces conditions seraient complètement aberrantes.

2^o) Remplissage de la cellule

Pour remplir la cellule, procéder, dans l'ordre suivant :

- Enlever le bouchon (5)
- Verser dans la cellule la quantité nécessaire du liquide à tester (11 cm³ avec l'électrode A, 19 cm³ avec l'électrode B, 11,5 cm³ avec l'électrode C, 16 cm³ avec l'électrode D). Le niveau du liquide doit se situer à environ 4 à 5 mm de la partie supérieure de la cellule pour assurer une réserve.

S'assurer que le liquide est exempt de bulles d'air, particulièrement dans le cas de liquides visqueux. On constate facilement le fait en observant le niveau du liquide qui s'abaisse, phénomène accompagné d'un dégagement de bulles d'air. Rétablir éventuellement le niveau.

ATTENTION - *Il ne faut en aucun cas verser le liquide dans le trou central du bouchon qui présente la forme d'un entonnoir mais qui ne joue absolument pas ce rôle.*

En opérant comme nous l'indiquons, l'air s'échappe facilement par le trou inférieur du bouchon et une partie du liquide remonte dans la partie élargie du trou central où elle constitue une réserve.

Il n'y a pas à ajuster le niveau du liquide à l'intérieur du bouchon, mais celui-ci ne doit pas être vide. Lorsque l'on effectue des mesures sur des liquides très volatils (sulfure de carbone par exemple), il faut recouvrir le bouchon de son couvercle plastique pour ralentir l'évaporation et contrôler à la fin de la mesure qu'il reste encore du liquide dans le bouchon.

Le liquide contenu dans le bouchon ne joue qu'un rôle de réserve, et grâce à celle-ci

on peut mesurer avec cette cellule des liquides très volatils même à température élevée sans observer aucune dérive au cours de la mesure. Le niveau dans le bouchon peut être réajusté en cours de mesure sans inconvénient.

Il est à remarquer que le bouchon doit être enfoncé complètement dans le corps de la cellule. La capacité active n'est exacte qu'à cette condition.

Bulles d'air :

Une bulle d'air emprisonnée dans la cellule peut fausser une mesure. Ceci se produit en particulier :

- Si la cellule n'a pas été parfaitement nettoyée
- Si l'on a procédé au remplissage en versant le liquide dans le bouchon (il n'y a pas dans ce cas de sortie d'air).
- Si le liquide dégage du gaz au cours de sa mise en température.
- Si le liquide est très visqueux.

Pour s'assurer qu'il n'y a pas de bulles d'air dans la cellule, lui donner de petits chocs, avec le manche d'un tournevis par exemple. Si l'aiguille du voltmètre de surtension bouge, c'est le signe que des bulles d'air sont collées aux parois. Dans ce cas, continuer de donner des petits chocs jusqu'à ce qu'elles soient toutes détachées. Le voltmètre de surtension échelle ΔQ doit alors rester stable.

3°) Méthode de mesure

Pour le détail des mesures diélectriques, on se reportera à la méthode indiquée au début de ce chapitre, page 2.

Pratiquement, on effectue une mesure avec la cellule vide munie de son bouchon approprié puis une mesure avec la cellule pleine du liquide à mesurer.

La différence entre les capacités du condensateur micrométrique qui réalisent l'accord dans les deux cas et entre les valeurs du coefficient de surtension indiqué par le Q.Mètre donnent deux chiffres :

$$\Delta C \quad \text{et} \quad \Delta Q$$

On en déduit :

$$k = 1 + \frac{\Delta C}{C_a}$$

$$\text{tg} \delta = \frac{\Gamma}{Q_0 \cdot Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta C + C_a}$$

Q_0 = coefficient de surtension pour la mesure " cellule vide "

Q = coefficient de surtension pour la mesure " cellule pleine "

$$Q = Q_0 - \Delta Q$$

$$\Gamma = \frac{1}{\omega^2 L}$$

L = inductance de la bobine de mesure

$\omega = 2\pi \times$ fréquence à laquelle la mesure a été faite

C_a = capacité active de la cellule

La grande stabilité et la qualité de l'usinage de la cellule CS 601 permettent de connaître la capacité active avec une très grande précision.

Dans la très grande majorité des cas, la précision des valeurs suivantes de C_a sera largement suffisante :

Pour l'électrode A avec le bouchon A-B, $C_a = 35$ pF

Pour l'électrode B avec le bouchon A-B, $C_a = 10$ pF

Pour l'électrode C avec le bouchon C-D, $C_a = 5$ pF

Pour l'électrode D avec le bouchon C-D, $C_a = 1$ pF

Pour un étalonnage plus précis, voir ci-après le paragraphe " Etalonnage de la cellule ".

4°) Influence de la température

La constante diélectrique et les pertes haute fréquence d'un produit peuvent dans certains cas varier rapidement avec la température. Une différence de 1°C produit alors un changement décelable.

Lorsque cette circonstance se produit, il faut établir une circulation de liquide à température constante.

On raccorde pour cela la cellule à une circulation thermostatée par les deux ajutages qui sortent du corps de la cellule.

Il faut prendre la précaution d'attendre, après avoir rempli la cellule et avant d'effectuer la mesure, que le liquide ait pris la température de la cellule. Il suffit pour cela de 15 minutes au maximum. L'électrode centrale est beaucoup plus longue à atteindre l'équilibre thermique que le corps de la cellule. Pour accélérer la mise en température on peut court-circuiter les deux électrodes pendant 5 à 10 minutes avant le remplissage de la cellule au moyen des cylindres spéciaux prévus à cet effet.

Un thermomètre permet de mesurer la température du corps de la cellule.

La capacité active C_a de la cellule varie légèrement avec la température. Mais pour presque toutes les mesures courantes cette variation est négligeable. Les coefficients de correction sont donnés ci-après :

Pour l'électrode A, $\Delta C_a / \Delta T = + 2.10^{-3}$ pF par °C

Pour l'électrode B, $\Delta C_a / \Delta T = + 0,5.10^{-3}$ pF par °C

Pour l'électrode C, $\Delta C_a / \Delta T = + 0,1.10^{-3}$ pF par °C

Pour l'électrode D, $\Delta C_a / \Delta T$ est négligeable.

5°) Etalonnage de la cellule

Lorsque l'on désire opérer avec la précision la plus élevée possible, il faudra redéterminer la valeur de la capacité active de la cellule.

Il faut pour cela, disposer de benzène de qualité RP (pour analyses).

La constante diélectrique du benzène est parfaitement connue et peut être considérée comme un étalon.

$$k = 2,286 \pm 0,0002 \text{ à } 20^\circ$$

$$k = 2,277 \pm 0,0002 \text{ à } 25^\circ$$

soit
$$\frac{\Delta k}{\Delta T} = 0,0018 \pm 0,0002 \text{ par degré centésimal}$$

Opérer comme pour déterminer la constante diélectrique d'un liquide. Noter le ΔC obtenu avec le condensateur micrométrique. On a :

$$C_a = \frac{\Delta C}{k - 1}$$

La cellule sera thermostatée par circulation d'un liquide approprié dans le canal hélicoïdal prévu à cet effet. Voir page 11 " Contrôle de la température du liquide ".

II - 3 - CELLULE A SOLIDES TYPE CS 701

a) Réglage de l'écartement des plateaux

Le réglage de l'écartement des plateaux se fait par l'intermédiaire du capuchon qui coiffe la partie supérieure de la cellule. Ce capuchon possède une partie moletée et une partie lisse conique. En prenant en main la partie moletée et en la tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, on écarte les plateaux de la cellule. Lorsque l'écart est suffisant, y introduire l'échantillon en ayant soin de bien le centrer. Tourner ensuite le capuchon de la cellule dans le sens des aiguilles d'une montre pour rapprocher les plateaux. Lorsque ceux-ci entrent en contact avec l'échantillon, on sent nettement un débrayage, puis en continuant de tourner, on arrive en butée. *Il est extrêmement important de ne jamais forcer en essayant de tourner le capuchon au-delà de cette butée, afin de ne pas risquer de détériorer la vis micrométrique de la cellule.*

Très important - La lecture de la graduation micrométrique et de l'échelle des capacités actives (visible à travers le couvercle transparent du capuchon) doit se faire à l'instant du débrayage des plateaux. Pour effectuer une lecture précise, il faut opérer de la manière suivante :

- 1 - Tourner lentement la partie moletée de la tête micrométrique dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à l'obtention du débrayage complet (au maximum un demi tour de la tête micrométrique au-delà du débrayage, sinon il y a risque de détériorer la précision du palmer.

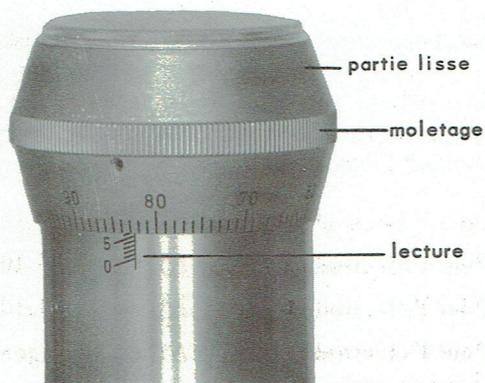


Figure 4

Le débrayage est l'instant où l'entraînement de la tête micrométrique devient libre.

Lorsque le débrayage est obtenu, les plateaux maintiennent fortement l'échantillon. Pour un échantillon d'épaisseur 3 mm environ, une pression de 9 kg environ est exercée.

- 2 - Prendre entre le pouce et l'index le capuchon de la cellule par *sa partie conique lisse* et en exerçant la pression la plus faible possible, le tourner *dans le sens inverse des aiguilles d'une montre*. Lorsque la vis micrométrique atteint la position précise où le débrayage des plateaux doit commencer, le couple à fournir au capuchon de la cellule augmente brusquement. Il n'est pas possible alors de fournir l'effort nécessaire avec seulement deux doigts exerçant une pression moyenne sur la partie lisse - partie dont l'angle conique a été spécialement étudié à cette fin. On a alors l'impression d'une butée. C'est seulement lorsque le capuchon a atteint cette position qu'il convient d'effectuer la lecture des échelles.

b) Lecture des échelles

L'écartement des plateaux se lit, à la façon d'un palmer, sur la graduation micrométrique du capuchon de la cellule dont chaque petite graduation correspond à 1/100ème de mm. Sur le corps cylindrique de la cellule une autre graduation permet de repérer le nombre de tours. Chaque tour correspond à un écartement de 1 mm. La capacité de la vis est de 7 tours. La cellule peut donc accepter des échantillons ayant jusqu'à 7 mm d'épaisseur.

c) Méthode de mesure

- 1°) Avant de passer à la mesure suivante, il faut repérer l'écartement " e " des plateaux de la cellule qui correspond à l'épaisseur de l'échantillon. On procèdera comme suit :
 - a) Placer l'échantillon entre les deux plateaux de la cellule et serrer ceux-ci à l'aide du palmer jusqu'au débrayage ; desserrer alors jusqu'au " dur " de la commande :
 - b) Lire l'indication du micromètre de la cellule (au 1/100e de mm) et noter " e ".
 - c) Enlever l'échantillon et ramener le micromètre à la valeur lue précédemment.
- 2°) Ensuite chercher la résonance Q_0 au moyen du condensateur variable du Q.Mètre ; une fois finement réglé sur l'accord, **on ne retouchera plus à ce condensateur**. Ce réglage sera réalisé en s'aidant du voltmètre de surtension placé sur l'échelle ΔQ , le **condensateur micrométrique étant réglé à zéro**.
- 3°) Amener l'aiguille du voltmètre de surtension sur la division " 0 ", bout d'échelle, au moyen des réglages " Gros " et " Fin "。

Noter Q_0 lu sur le voltmètre de surtension du Q.Mètre en plaçant le commutateur sur la position " Q " (attention au tarage correct de l'injection du Q.Mètre, coefficient de multiplication $\times 1$ ou $\times 2$).
- 4°) Replacer l'échantillon entre les plateaux de la cellule et serrer le palmer pour retrouver le même écartement des plateaux que précédemment de la même façon.

Dans ces conditions, le circuit de mesure se trouve désaccordé. On cherchera à nouveau la résonance **sans retoucher au réglage du CV du Q.Mètre**, en manœuvrant le condensateur micrométrique. Noter la valeur ΔC obtenue.

Le maximum d'élongation lu sur le voltmètre de surtension échelle ΔQ sera inférieur à la déviation initiale. On notera la valeur de ΔQ et on en déduira la nouvelle valeur du coefficient de

surtension.

$$Q = Q_0 - \Delta Q$$

Comme on a :

$$\Delta Q = Q_0 - Q$$

$$\Delta C = C_0 - C$$

il ne reste plus qu'à déterminer C_a pour pouvoir calculer k et $\text{tg}\delta$.

Pratiquement :

$$k = 1 + \frac{\Delta C}{C_a} \tag{4}$$

$$\text{tg}\delta = \frac{\Gamma}{Q_0 \cdot Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta C + C_a} \tag{5}$$

ΔC = graduation du condensateur micrométrique en picofarads, c'est-à-dire $C_0 - C$

ΔQ = indication du voltmètre de surtension, c'est-à-dire $Q_0 - Q$

d) Détermination de C_a

La valeur de la capacité active " C_a " de la cellule dépend des dimensions géométriques de l'échantillon par rapport au diamètre des plateaux.

Echantillon de diamètre 50 mm

Pour des échantillons dont le diamètre est de 50 mm, la valeur de C_a est graduée directement sur le cadran situé dans la partie supérieure de la cellule. L'index indique C_a lue en fonction de l'épaisseur de l'échantillon, de 7 mm environ à 0,5 mm.

Echantillon de diamètre 50 mm et d'épaisseur inférieure à 1,5 mm

Pour des échantillons d'épaisseur inférieure à 1,5 mm et de diamètre 50 mm, les lectures de C_a lue sur le cadran deviennent imprécises. On se reportera alors à la courbe d'éta-lonnage de la figure 5 quand le maximum de précision est demandé.

Echantillon de diamètre inférieur à 50 mm

Pour des échantillons de diamètre inférieur à 50 mm, la capacité active réelle sera calculée par l'expression :

$$C_{a \text{ (réelle)}} = C_{a \text{ (lue)}} \times \frac{d^2}{2500}$$

d (en mm)

$C_{a \text{ (lue)}}$ étant chiffrée sur le cadran de la cellule ou sur la courbe de la figure 5.

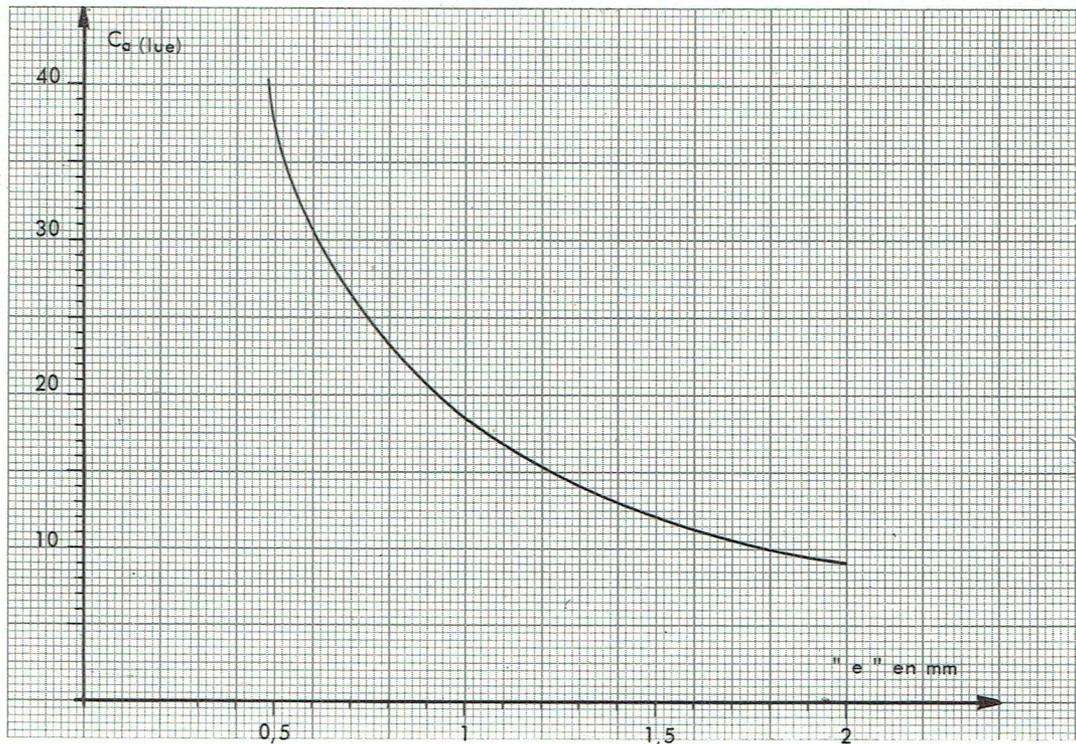


Figure 5 - Courbe d'étalonnage en C_a pour des échantillons de faible épaisseur et de $\phi = 50$ mm.

Capacité active théorique $C_a(th)$

La capacité active théorique de la cellule pour solides type CS 701 est en première approximation :

$$C_a(th) = 6,944 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d^2}{e}$$

$$\neq 7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d^2}{e}$$

" d " étant le diamètre de l'échantillon en mm

" e " étant l'épaisseur de l'échantillon en mm

Pour une mesure de précision, il est nécessaire de tenir compte des corrections dues aux effets de bords et à la distorsion du champ électrique par le diélectrique. On déterminera alors C_a au moyen des courbes de correction.

Capacité active mesurée C_a mesurée

La capacité active mesurée est donnée par les courbes des figures 5 et 6. On voit qu'en fonction de l'épaisseur, l'erreur de $\frac{C_a}{C_a(th)}$ est faible.

L'emploi de ces courbes permettra d'obtenir des valeurs de C_a mesurée plus précises pour les faibles épaisseurs.

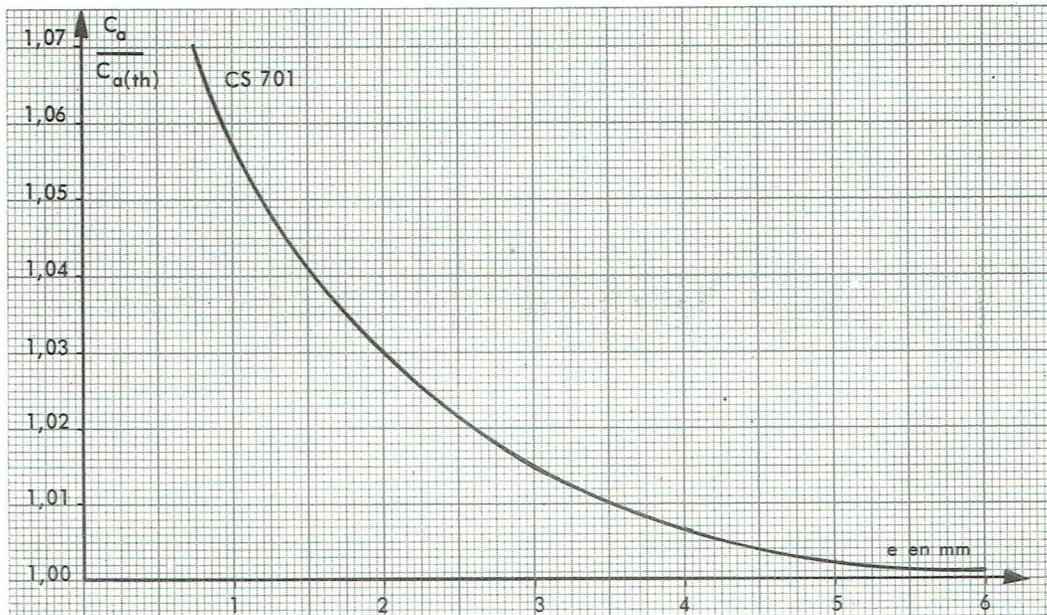


Figure 6 - Variation du rapport $\frac{C_a}{C_a(th)}$ en fonction de l'épaisseur de l'échantillon.

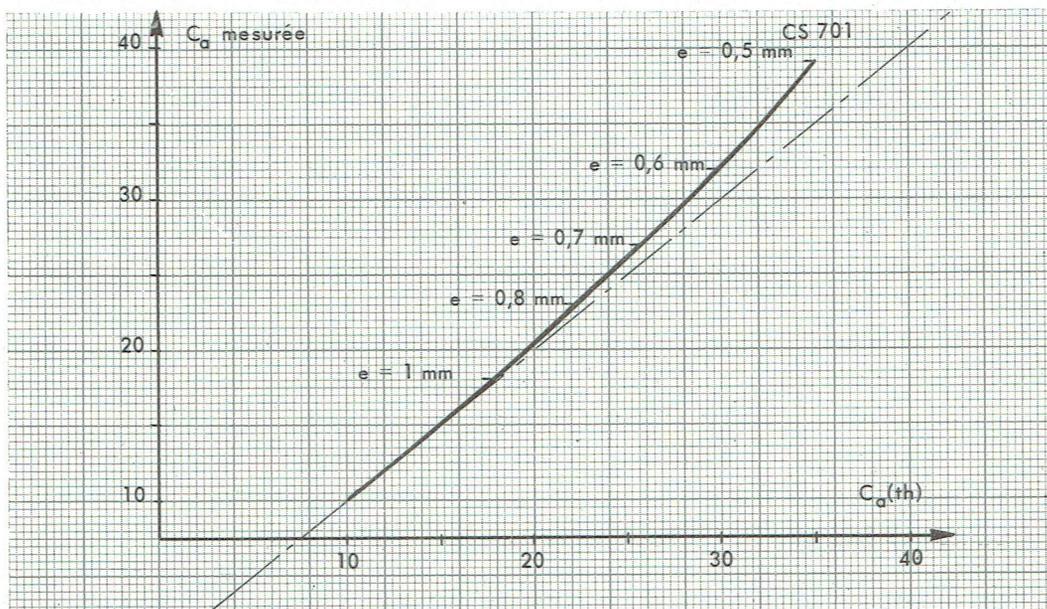


Figure 7 - Ecart en C_a et $C_a(th)$ en fonction de l'épaisseur de l'échantillon.

e) Mesure sur des produits pâteux

Il faut dans ce cas utiliser la coupelle fournie avec la cellule et à cause de l'influence de son diélectrique, les courbes d'étalonnage cessent d'être valables.

On procède alors par comparaison :

Pour cela, on taille dans un diélectrique solide, un échantillon s'adaptant exactement à l'intérieur de la coupelle et d'épaisseur légèrement inférieure à la profondeur de celle-ci.

On mesure sa constante diélectrique sans la coupelle, en utilisant la méthode indiquée plus haut. Soit k_1 la valeur trouvée.

Ensuite :

- a) placer la coupelle avec l'échantillon dans la cellule. Serrer les plateaux et noter la valeur du micromètre.
- b) enlever l'échantillon et ramener le micromètre à la même valeur, mettre le condensateur micrométrique à zéro et réaliser la résonance avec le condensateur d'accord du Q.Mètre.
- c) replacer l'échantillon et rétablir la résonance au moyen du condensateur micrométrique. Soit C_1 la valeur lue sur ce condensateur.

La capacité active de la coupelle sera :

$$C_{ac} = \frac{C_1}{k_1 - 1}$$

On pourra ensuite mesurer un produit pâteux placé dans la coupelle sous réserve que :

- le micromètre soit ramené à la même division que lors de l'étalonnage avec l'échantillon solide.
- la constante diélectrique trouvée pour le produit pâteux ne soit pas trop différente de celle k_1 du solide ayant servi à l'étalonnage,
- lors de la mesure du produit pâteux, il n'y ait pas de lames d'air.

f) Influence des lames d'air

La cellule de mesure type CS 701 par sa conception élimine les lames d'air dués à un défaut de parallélisme. En effet, son plateau supérieur oscillant peut absorber des écarts de parallélisme atteignant 2 mm.

Néanmoins, des défauts de surface, par exemple des déformations dans les pièces moulées, font apparaître des lames d'air qui peuvent avoir une action importante. En effet, les condensateurs élémentaires formés par les lames d'air ont pour diélectrique l'air dont la constante k est voisine de 1. Le reste du condensateur étant constitué d'un diélectrique isolant de constante k toujours supérieure à celle de l'air, les mesures seront toujours entachées d'erreur.

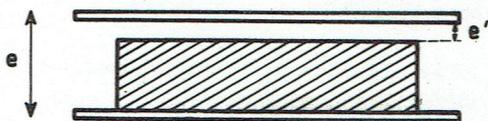


Figure 8

$$\frac{C'}{C} = \frac{e}{e + ke'}$$

Soit :

C' la capacité mesurée avec interposition d'une lame d'air d'épaisseur e'
 et C la capacité réelle obtenue si $e' = 0$

On démontre facilement que :

L'erreur commise sur la mesure de " k " lorsque vient s'interposer une lame d'air, a donc pour expression :

$$\frac{\Delta k}{k} = k \frac{e'}{e + ke'}$$

De même, l'erreur commise sur $\text{tg}\delta$ est encore :

$$\frac{\Delta \text{tg}\delta}{\text{tg}\delta} = k \frac{e'}{e + ke'}$$

Si $ke' \ll e$, on a donc :

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta \text{tg}\delta}{\text{tg}\delta} = \frac{ke'}{e}$$

Les valeurs mesurées " k " et $\text{tg}\delta$ sont erronées par défaut.

EXEMPLES PRATIQUES DE MESURES

(f 50 kHz)

MESURES SUR DES LIQUIDES

Exemple 1

Huile silicone type 47 V 300 utilisée en vaporisation sur le matériel à destination d'outremer.

En l'absence de tout appareillage auxiliaire, la bobine étalonnée du Jeu M 621 B correspondant à la fréquence de l'essai, étant seule sur les bornes du Q.Mètre, on note à la résonance la capacité d'accord Γ du condensateur du Q.Mètre.

$$\Gamma = 458 \text{ pF}$$

Fréquence de l'essai : 1340 kHz

On place ensuite le condensateur micrométrique type EM 202 A et la cellule type CS 601 munie de son électrode A, sans introduire le liquide.

On recherche la résonance sans toucher à la fréquence et en agissant uniquement sur le CV du Q.Mètre, le condensateur micrométrique étant mis au zéro.

On obtient :

$$Q_0 = 220$$

On règle ensuite le voltmètre de surtension échelle ΔQ pour que son aiguille soit au maximum de la déviation ($\Delta 0$).

On retire ensuite le couvercle A-B et on verse dans la cellule environ 11 cm³ de liquide. On replace le couvercle en ayant soin de l'enfoncer doucement et bien à fond.

Important : il doit y avoir du liquide à l'intérieur du bouchon, son niveau est sans importance.

On recherche ensuite la résonance en agissant uniquement sur le condensateur micrométrique.

On note :

$$\Delta Q = 2,5 \text{ (le tarage du Q.Mètre étant réglé sur } Q \times 1)$$

$$Q = Q_0 - \Delta Q = 217,5$$

$$\Delta C = 68,25 \text{ pF}$$

La capacité active de la cellule étant $C_a = 35 \text{ pF}$, on en déduit par application des formules :

$$k = 1 + \frac{\Delta C}{C_a} \qquad \text{tg}\delta = \frac{\Gamma}{Q_0 \cdot Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta C + C_a}$$

$$k = 1 + \frac{68,25}{35} = \boxed{2,95}$$

$$\text{tg}\delta = \frac{458}{220 \times 217,5} \times \frac{2,5}{68,25 + 35} = \boxed{2,3 \cdot 10^{-4}}$$

Exemple 2

Benzène

Même fréquence d'essai que pour l'exemple 1.

On opère comme pour l'exemple précédent. On trouve :

$$\Delta Q = \text{inappréciable}$$

$$\Delta C = 44,8$$

On en déduit :

$$k = 1 + \frac{44,8}{35} = \boxed{2,28}$$

$$\text{tg}\delta \neq \boxed{10^{-5}}$$

MESURES SUR DES SOLIDES

Exemple 1

Echantillon : bakélite HF à charge minérale, rondelle de 50 mm de diamètre, taillée dans une plaque dite de " 3 mm ".

Fréquence de l'essai : 1,5 MHz

En l'absence de tout appareillage auxiliaire, la bobine étalonnée n° 7 du jeu M 621 B

correspondant à la fréquence de l'essai, étant seule sur les bornes du Q.Mètre, on note à la résonance la capacité d'accord Γ du Q.Mètre.

$$\Gamma = 312 \text{ pF}$$

On place ensuite le condensateur micrométrique type EM 202 A et la cellule de mesures pour solides CS 701 comme indiqué page 8.

L'épaisseur de l'échantillon est mesurée comme indiqué page 17.

On trouve " e " = 2,90 mm.

L'échantillon est retiré, puis on ramène les plateaux de la cellule à l'écartement " e ", en réglant avec la vis micrométrique de la cellule.

Le voltmètre de surtension du Q.Mètre étant sur la position Q, on recherche à nouveau la résonance, en agissant uniquement sur le CV du Q.Mètre, le condensateur micrométrique étant mis à zéro. On trouve :

$$Q_0 = 308 \text{ (injection sur } Q \times 2)$$

On tare le voltmètre de surtension échelle ΔQ au maximum de déviation, graduation " 0 " de l'échelle inférieure.

On replace ensuite l'échantillon entre les plateaux de la cellule, on règle à nouveau l'écartement à 2,90 mm et sans retoucher au CV du Q.Mètre, on recherche la résonance à l'aide du condensateur micrométrique.

On trouve ainsi :

$$\Delta Q = 64$$

$$Q = Q_0 - \Delta Q = 308 - 64 = 244$$

$$\Delta C = 20,7 \text{ pF}$$

On lit directement sur le cadran de la cellule la valeur de la capacité active pour l'épaisseur de l'échantillon et pour un diamètre de 50 mm.

$$\text{Soit } C_{a(\text{lue})} = 6,2$$

d'où on déduit :

$$k = 1 + \frac{\Delta C}{C_a} = 1 + \frac{20,7}{6,2} = \boxed{4,33}$$

$$\text{tg} \delta = \frac{\Gamma}{Q_0 \cdot Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta C + C_a} = \frac{312}{308 \times 244} \times \frac{64}{20,7 + 6,2} = \boxed{9,7 \cdot 10^{-3}}$$

Exemple 2

Matériau : Epoxy F 641

diamètre de l'échantillon : 42 mm

épaisseur de l'échantillon : 4,02 mm.

Fréquence de l'essai : 1,5 MHz

Avec les notations précédentes, on a tout d'abord à la résonance :

$$\Gamma = 312 \text{ pF}$$

Après installation de l'appareillage auxiliaire, on note à la résonance :

$$Q_0 = 308$$

On tare le voltmètre de surtension du Q.Mètre comme indiqué plus haut.

On replace ensuite l'échantillon entre les plateaux, on réajuste l'écartement avec la vis micrométrique et sans retoucher au CV du Q.Mètre, on recherche la nouvelle résonance, en agissant uniquement sur le condensateur micrométrique.

On trouve :

$$\Delta Q = 66$$

$$\Delta C = 10,4 \text{ pF}$$

$$Q = 308 - 66 = 242$$

L'indication du cadran de la cellule donne :

$$C_{a(lue)} = 4,35 \text{ pF}$$

Cette valeur de C_a lue n'est valable que pour un échantillon de diamètre 50 mm. L'échantillon mesuré ici a un diamètre inférieur : 42 mm.

En appliquant la formule de la page 18, on obtient :

$$C_{a(réelle)} = C_{a(lue)} \times \frac{d^2}{2500} \quad d^2 \text{ en millimètres}$$

$$C_{a(réelle)} = 4,35 \times \frac{42^2}{2500} = 3,06 \text{ pF}$$

d'où l'on déduit :

$$k = 1 + \frac{10,4}{3,06} \neq \boxed{3,4}$$

$$\text{tg} \delta = \frac{\Gamma}{Q \cdot Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta C + C} = \frac{312}{308 \times 242} \times \frac{66}{10,4 + 3,06} = \boxed{2,04 \cdot 10^{-2}}$$

Exemple 3

Matériau : circuit imprimé, 1 face cuivre épaisseur 7/100 mm
diamètre de l'échantillon : 50 mm
épaisseur de l'échantillon : 1,52 mm avec une épaisseur de cuivre
: 1,45 mm isolant seul

Fréquence de l'essai : 1,5 MHz

$$\Gamma = 312 \text{ pF}$$

$$Q_0 = 308$$

$$\Delta Q = 218$$

$$Q = 90$$

$$\Delta C = 36,9 \text{ pF}$$

Après avoir enlevé l'échantillon, on place la vis micrométrique sur une épaisseur de 1,45 mm représentant l'épaisseur de l'isolant seulement. On lit sur le cadran de la cellule la capacité active $C_a = 12,8 \text{ pF}$

Mais étant donné qu'il s'agit d'un échantillon d'épaisseur inférieure à 1,5 mm, pour plus de précision on peut utiliser l'abaque de la figure 5 donnant C_a lue pour les faibles épaisseurs. (page 19).

$$e = 1,45 \text{ mm} \qquad C_a \text{ lue} = 12,6 \text{ pF}$$

$$k = 1 + \frac{36,9}{12,6} = \boxed{3,92}$$

$$\text{tg} \delta = \frac{312}{308 \times 90} \times \frac{218}{36,9 + 12,6} = \boxed{4,95 \cdot 10^{-2}}$$

Exemple 4

Matériau : échantillon de Téflon (tétrafluoréthylène)
diamètre : 50 mm
épaisseur : 0,8 mm

Fréquence de l'essai : 10 MHz

$$\Gamma = 370 \text{ pF}$$

$$Q_0 = 200$$

$$\Delta Q = 1$$

$$Q = 199$$

$$\Delta C = 19,5 \text{ pF}$$

On lit C_a lue sur le cadran = 24 pF

L'épaisseur de l'échantillon étant faible, on se reporte à la courbe (figure 5) ; on a :
 C_a lue = 23 pF

$$k = 1 + \frac{19,5}{23} = \boxed{1,85}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{370}{200 \times 199} \times \frac{1}{19,5 + 23} = \boxed{2,1 \cdot 10^{-4}}$$

Exemple 5

Matériau : plexiglass
diamètre de l'échantillon : 50 mm
épaisseur de l'échantillon : 3,71 mm

Fréquence de l'essai : 10 MHz

$$\Gamma = 370 \text{ pF}$$

$$Q_o = 200$$

$$\Delta Q = 6$$

$$Q = 194$$

$$\Delta C = 6,17 \text{ pF}$$

On lit C_a sur le cadran : $C_a \text{ lue} = 4,7 \text{ pF}$

$$k = 1 + \frac{6,17}{4,7} = \boxed{2,3}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{370}{200 \times 194} \times \frac{6}{6,17 + 4,7} = \boxed{5,35 \cdot 10^{-3}}$$

Nota : il est important de considérer les résultats précédents comme variables seulement pour les échantillons utilisés dans des conditions de température et d'humidité ambiantes déterminées.

MESURES EN BASSE FREQUENCE

(de 800 Hz environ à 50 kHz)

Pour effectuer des mesures en Basse Fréquence avec le Q.Mètre, il convient de l'alimenter au moyen de la prise spéciale prévue à cet effet sur le panneau avant, par un générateur extérieur pouvant fournir une puissance d'environ 1 watt. (On se reportera pour les problèmes d'adaptation d'impédances et pour les précautions à prendre, relativement à la protection du thermocouple, à la notice sur les accessoires pour les mesures en BF).

D'autre part, pour obtenir la résonance en Basse Fréquence, il est nécessaire de connecter sur la gauche du condensateur micrométrique EM 202 A, la boîte de capacités d'accord EA 101 et d'utiliser celle des bobines du jeu spécial MA 101 qui convient à la fréquence de mesure choisie.

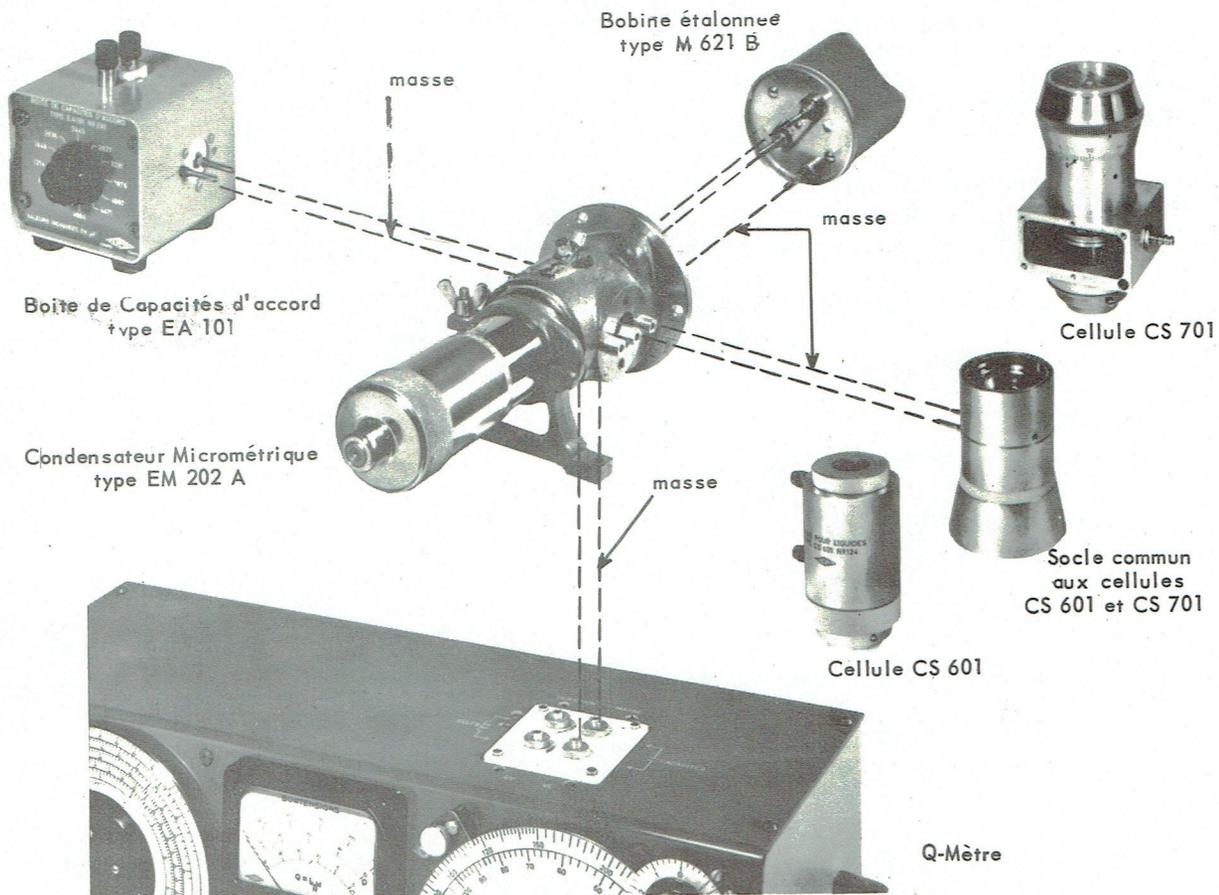


Figure 9

MODE OPERATOIRE

Le mode opératoire et les précautions à prendre pour la mesure de k et de $tg\delta$ sont exactement les mêmes que pour les fréquences supérieures à 50 kHz. Les formules à appliquer sont également les mêmes.

Les seules différences notables sont les suivantes :

a) Détermination de Γ

On déterminera la capacité Γ qui figure dans la formule donnant $tg\delta$:

- soit en la calculant au moyen de la formule

$$\Gamma = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}$$

f = fréquence de mesure en Hz

L = inductance de la bobine de mesure en Henry. On obtient alors Γ en farads.

- soit en la mesurant par le mode opératoire suivant :

A l'exclusion de tout autre appareillage auxiliaire,

- brancher sur le Q.Mètre la bobine de mesure choisie et la boîte de capacités d'accord EA 101 que l'on raccordera conformément à la figure 10, au moyen des barrettes coudées 1 et 2 prévues à cet effet.

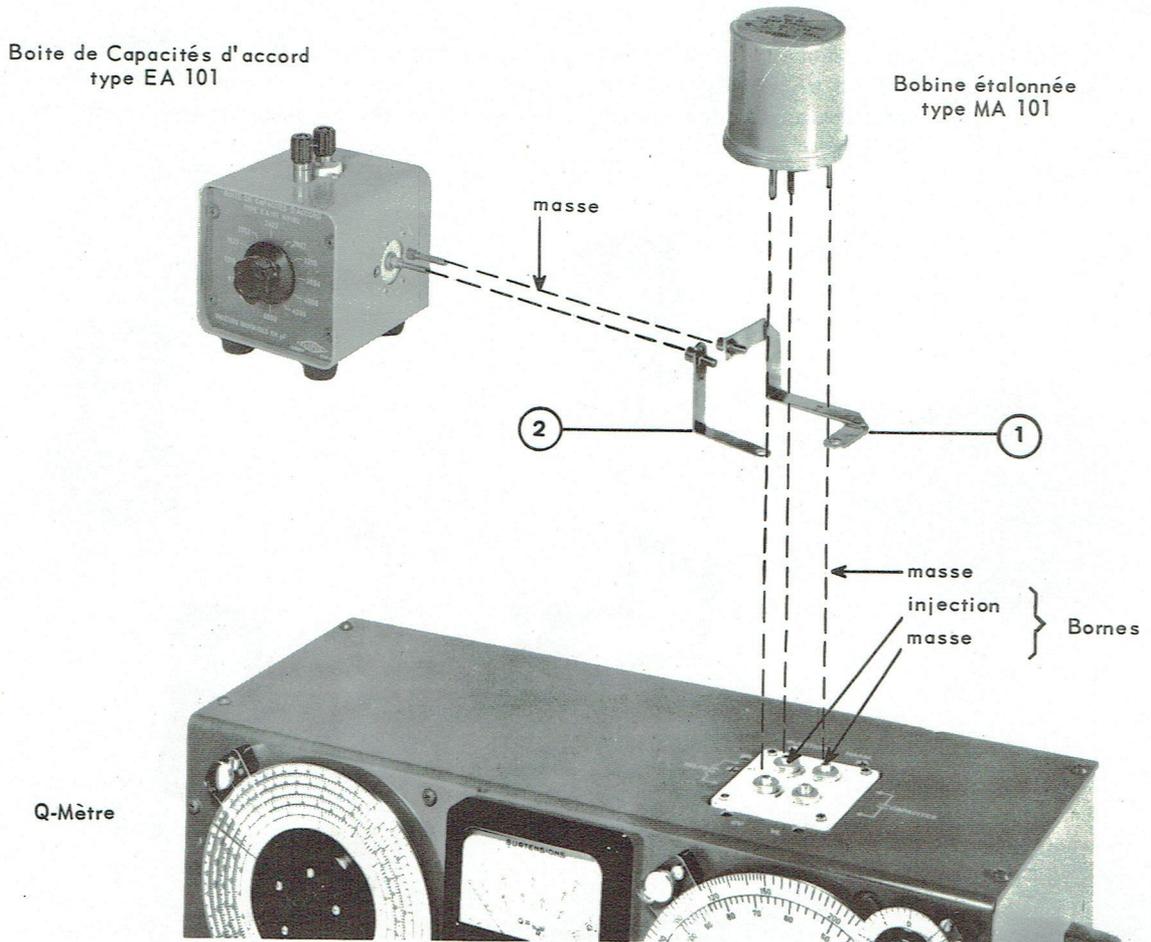


Figure 10

- régler le générateur extérieur sur la fréquence " f " choisie pour la mesure et rechercher la résonance au moyen du contacteur de la boîte EA 101 et du CV du Q.Mètre.

On obtient alors Γ en ajoutant : la capacité lue sur le cadran du CV du Q.Mètre, la capacité indiquée par le contacteur de la boîte EA 101, plus la capacité parasite de la barrette de connexion n° 2 qui est égale à 4 pF.

$$\Gamma = C (\text{CV du Q.Mètre}) + C (\text{boîte d'accord}) + 4 \text{ pF.}$$

On débranche ensuite les barrettes de connexion et on monte les accessoires pour mesures diélectriques (voir figure 9, page 28).

Remarque : le fait que les barrettes 1 et 2 ne sont plus utilisées pour les mesures diélectriques n'a aucune influence sur les résultats.

b) Conduite des mesures

On déterminera la variation ΔQ comme il a déjà été décrit avec le voltmètre de surtension du Q.Mètre sur l'échelle ΔQ ou sur l'échelle Q lorsque la variation est trop importante.

L'acuité de la résonance étant en général beaucoup plus faible en basse fréquence, on se servira dans tous les cas de l'échelle ΔQ comme indicateur de résonance. C'est seulement de cette manière que l'on obtiendra une précision suffisante dans la mesure de ΔC .

ΔC sera déterminé soit au moyen du condensateur micrométrique, soit au moyen du CV du Q.Mètre, si ΔC est supérieur à 80 pF. Il n'y a aucune précaution spéciale à prendre, car en basse fréquence, les inductances parasites des barrettes de connexion entre les divers condensateurs ne jouent plus aucun rôle perturbateur.

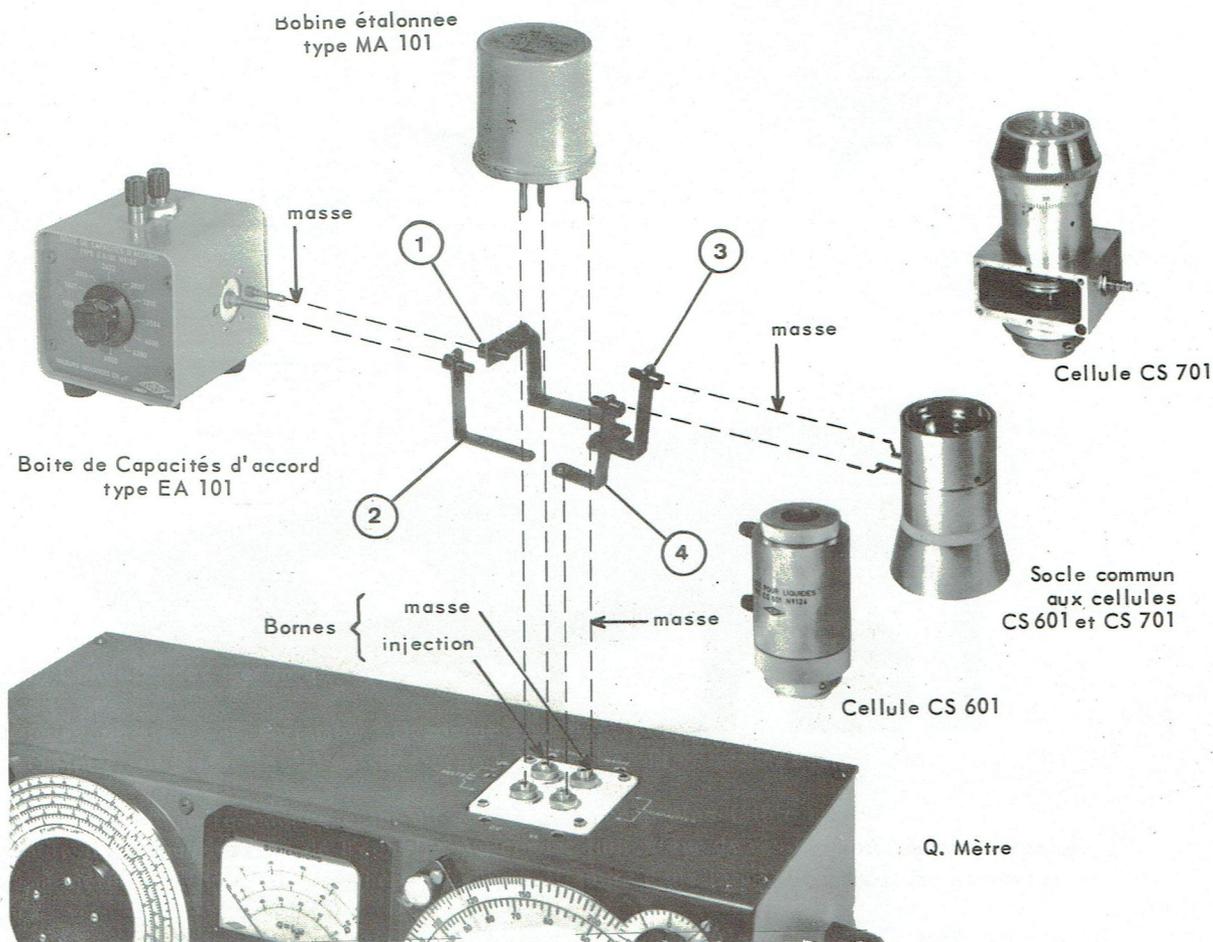


Figure 11

Remarque : pour des mesures sans grande précision (dégrossissage), il est possible d'utiliser un montage simplifié sans condensateur micrométrique. Dans ce cas, la cellule de mesures est alors reliée directement au Q.Mètre, au moyen des barrettes 3 et 4 prévues à cet effet. La bobine de mesure se fixe directement sur la platine et la boîte d'accord EA 101 est reliée par les barrettes 1 et 2. Le " ΔC " est déterminé au moyen du CV du Q.Mètre.

EXEMPLES PRATIQUES DE MESURES

(800 Hz < f < 50 kHz)

MESURES SUR DES LIQUIDES

Exemple 1

Echantillon : vernis d'imprégnation pour transformateur type ISONEL 31

On utilise la cellule à liquides type CS 601.

Le volume utilisé est de 11 cm³ avec l'électrode A.

Fréquence de la mesure : 2 kHz.

On utilise la bobine n° 1 du jeu de bobines BF type MA 101.

Détermination de Γ

On procède comme il est indiqué à la page 28. On obtient :

Capacité de la boîte d'accord type EA 101	:	411 pF
Capacité du CV du Q.Mètre	:	402 pF
Capacité de la barrette	:	4 pF

$$\Gamma = 817 \text{ pF}$$

On met en place le condensateur micrométrique comme il est indiqué page 28 et sur la figure 9.

Le condensateur micrométrique EM 202 A est placé sur 80 pF et la cellule CS 601 toujours vide, mais équipée du bouchon A-B, on recherche la résonance au moyen du CV du Q.Mètre.

A la résonance, on lit :

$$Q_0 = 198$$

On enlève alors le bouchon A-B de la cellule et on la remplit de liquide " échantillon ". Le niveau doit se situer à environ 4 à 5 mm du bord supérieur de la cellule.

Remettre en place le bouchon A-B **lentement**. En effet, le trou central du bouchon est de faible diamètre et selon la viscosité du liquide, il faudra opérer plus ou moins lentement. Le liquide doit monter dans le trop plein servant de réserve. Egalement selon la viscosité du liquide, il est nécessaire d'attendre quelques minutes pour être certain qu'il n'existe plus de bulles d'air.

A l'aide du condensateur micrométrique, rechercher la résonance sans retoucher au réglage du CV du Q.Mètre.

Les mesures donnent :

$$\Delta C = 79 \text{ pF}$$

$$\Delta Q = 45$$

$$Q = Q_0 - \Delta Q = 198 - 45 = 153$$

Pour l'électrode A et le bouchon A-B, la capacité active $C_a = 35$ pF.

On en déduit :

$$k = 1 + \frac{\Delta C}{C_a} = 1 + \frac{79}{35} = \boxed{3,25}$$

$$\text{tg}\delta = \frac{\Gamma}{Q_0 \cdot Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta C + C_a} = \frac{817}{198 \cdot 153} \cdot \frac{45}{79 + 35} = \boxed{1,06 \cdot 10^{-2}}$$

MESURES SUR DES SOLIDES

Exemple 1

Mesure des pertes dues à l'humidité résiduelle dans de la poudre de silice.

Fréquence de la mesure : 900 Hz.

On utilise la bobine n° 4 du jeu de bobines BF type MA 101.

Détermination de Γ

On procède comme il est indiqué à la page 28. On obtient :

Capacité de la boîte d'accord EA 101	: 4019 pF
Capacité du CV du Q.Mètre à la résonance	: 430 pF
Capacité de la barrette	: 4 pF

$$\Gamma = 4453 \text{ pF}$$

On utilise la cellule de mesure pour solides CS 701. La poudre de silice est placée dans la coupelle fournie avec la cellule. On la tasse au moyen du plateau supérieur de la cellule et on repère la position du plateau sur la tête micrométrique.

Le condensateur micrométrique EM 202 A est placé sur 10 pF et on recherche la résonance au moyen du CV du Q.Mètre. A la résonance, on lit :

$$Q = 105$$

On enlève alors la coupelle, on la vide, on la remet en place et on ramène le plateau supérieur de la cellule à la position repérée. Sans toucher au CV du Q.Mètre, on rétablit la résonance au moyen du condensateur micrométrique. On lit alors :

$$Q_0 = 180$$

$$C \text{ (micrométrique)} = 43 \text{ pF. On a donc : } \Delta C = 43 - 10 = 33 \text{ pF.}$$

Remarque : il est à noter que le procédé pratique utilisé pour la mesure de Q_0 , Q et ΔC est différent des exemples précédents. En effet, il serait pratiquement impossible de retrouver 2 fois exactement les mêmes mesures d'épaisseur " e " et de densité de poudre. Néanmoins, le principe de la mesure reste identique.

$$\Delta Q = Q_0 - Q = 75$$

Détermination de la capacité active de la coupelle

La position repérée de la tête micrométrique étant 5,70 mm, on serre les plateaux sur le fond de la coupelle vide (convenablement nettoyée, pour qu'il ne reste aucun grain de silice), on lit : 1,97 mm. L'épaisseur de la silice était donc :

$$e = 5,70 - 1,97 = 3,73 \text{ mm.}$$

Placer l'indication du micromètre sur 3,73 mm après avoir enlevé la coupelle. On lit directement sur le cadran la valeur de la capacité active :

$$C_{a \text{ (lue)}} = 4,68 \text{ pF}$$

Correction à appliquer

Il faut tenir compte de la distorsion des lignes de force due au plexiglass de la coupelle. Pour cela, on opère comme il est indiqué à la page 20 " Mesures sur des produits pateux ".

On taille dans un bon isolant HF un disque s'adaptant dans la coupelle, dont on mesure la constante diélectrique k à la même fréquence que celle à laquelle on opère et dont l'épaisseur est à peu près la même que celle de la poudre. On utilisera par exemple un disque de Lucoflex :

Diamètre de l'échantillon	=	50 mm
Épaisseur de l'échantillon	=	3,05 mm
Constante diélectrique à 900 Hz : k	=	3,08

On place le disque de Lucoflex dans la coupelle et on serre le plateau supérieur de la cellule dont on repère la position. On place le condensateur micrométrique sur 80 et on établit la résonance avec le CV du Q.Mètre, les plateaux au même écartement que l'épaisseur de l'échantillon. On place ensuite le disque et on rétablit la résonance avec le condensateur micrométrique. On lit sa capacité. On a ici :

$$C = 68,8 \text{ pF} \quad \text{d'ou :}$$

$$\Delta C = 80 - 68,8 = 11,2 \text{ pF}$$

La capacité active de la coupelle est donc ici :

$$C_a = \frac{\Delta C}{k - 1} = \frac{11,2}{2,08} = 5,41 \text{ pF}$$

Or, la capacité active lue étant pour une épaisseur de 50 mm :

$$C_{a \text{ (lue)}} = 5,73 \text{ pF}$$

On obtient donc le facteur de correction :

$$\rho = \frac{C_a}{C_{a \text{ (lue)}}} = \frac{5,41}{5,73} = 0,945$$

Il faut multiplier par ce facteur la capacité active lue de la cellule mesurée pour

l'épaisseur de la silice. On obtient :

$$C_a = 0,945 \times 4,68 = 4,42 \text{ pF}$$

On a alors pour la poudre de silice :

$$k = 1 + \frac{\Delta C}{C_a} = 1 + \frac{33}{4,42} \# \boxed{7,5}$$

$$\text{tg } \delta = \frac{\Gamma}{Q_o \cdot Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta C + C_a} = \frac{4,45 \cdot 10^{-3}}{180 \cdot 105} \times \frac{75}{33 + 4,42} \# \boxed{4,7 \cdot 10^{-1}}$$

Remarque : les mesures effectuées sur la même poudre desséchée préalablement en étuve, conduisent à des valeurs plus faibles de k et $\text{tg } \delta$ (voir page 6 " Séjour en étuve "). On a là, une méthode très sensible du dosage de l'humidité absorbée.

Exemple 2

Mesures effectuées sur un disque de bakélite à charge minérale.

diamètre de l'échantillon : 50 mm

épaisseur de l'échantillon : 2,90 mm

a) Mesures à 900 Hz

On trouve :

$$Q_o = 183$$

$$\Delta Q = 5$$

$$\Delta C = 22,3 \text{ pF}$$

C_a lue sur le cadran directement pour l'échantillon ϕ 50 mm, $C_{a(\text{lue})} = 6,2 \text{ pF}$

$$k = 1 + \frac{\Delta C}{C_a} = 1 + \frac{22,3}{6,2} \# \boxed{3,59}$$

$$\text{tg } \delta = \frac{\Gamma}{Q_o \cdot Q} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta C + C_a} = \frac{4450}{183 \times 178} \times \frac{5}{22,3 + 6,2} \# \boxed{2,4 \cdot 10^{-2}}$$

b) Mesures à 4 kHz

A 4 kHz, on utilise la bobine n° 3 du jeu de bobines BF type MA 101.

On a : Capacité de la boîte d'accord : 1606 pF
 Capacité du CV du Q.Mètre : 342 pF
 Capacité de la barrette : 4 pF

$$\Gamma = 1952 \text{ pF}$$

Les mesures donnent :

$$Q_0 = 320$$

$$\Delta Q = 26$$

$$\Delta C = 21,6 \text{ pF}$$

On a donc :

$$k = 1 + \frac{21,6}{6,2} \neq \boxed{4,5}$$

$$\text{tg}\delta = \frac{1\ 950}{320 \times 294} \times \frac{26}{27,8} \neq \boxed{1,95 \cdot 10^{-2}}$$

Exemple 3

Mesures effectuées sur un échantillon de Progilite 201
diamètre : 42 mm
épaisseur : 3,96 mm

Fréquence de la mesure : 4 kHz

On détermine $\Gamma = 1952 \text{ pF}$

Les mesures donnent :

$$Q_0 = 318$$

$$\Delta Q = 168$$

$$Q = 150$$

$$\Delta C = 26,75 \text{ pF}$$

La valeur de C_a lue sur le cadran est : 4,4 pF

$$C_{a(\text{réelle})} = C_{a(\text{lue})} \times \frac{d^2}{2500} = 4,4 \times \frac{42^2}{2500} = 3,08 \text{ pF}$$

$$k = 1 + \frac{26,75}{3,08} \neq \boxed{8,7}$$

$$\text{tg}\delta \neq \boxed{4,1 \cdot 10^{-2}}$$

Exemple 4

Mesure d'une feuille de téflon
diamètre : 50 mm
épaisseur : 0,8 mm

Fréquence de la mesure : 16 kHz

On détermine $\Gamma = 1628$ pF

Les mesures donnent :

$$Q_0 = 357$$

$$\Delta Q = \text{non mesurable } (\neq 1)$$

$$\Delta C = 19 \text{ pF}$$

La valeur de C_a lue sur le cadran est de 24 pF, mais en raison de la faible épaisseur de l'échantillon la lecture est imprécise. Il est nécessaire dans ce cas de se reporter à la figure 5 qui donne la courbe d'étalonnage de C_a lue en fonction des faibles épaisseurs d'échantillon pour un diamètre de 50 mm (page 19).

pour $e = 0,8$ mm

C_a lue = 23 pF

On a donc :

$$k \neq \boxed{1,83}$$

$$\text{tg} \delta \neq \boxed{3.10^{-4}}$$

CHAPITRE II

RAPPEL THEORIQUE

I - DEFINITIONS

I - 1 - CONDENSATEUR A INFLUENCE TOTALE

Il s'agit d'un condensateur tel que celui de la figure 1, dont l'une des armatures, reliée à la masse, entoure complètement l'autre.

Théoriquement, un tel condensateur est impossible à brancher sur un appareil de mesure extérieur, car l'électrode externe ne doit posséder **aucune ouverture**. Pratiquement, il faut bien admettre l'existence d'un fil de connexion très fin passant par un trou de faible diamètre pratique dans l'électrode externe.

I - 2 - CAPACITE ET CONSTANTE DIELECTRIQUE

Si après l'avoir convenablement déchargé, on relie l'électrode interne du condensateur de la figure 1, à une pile de tension V, par l'intermédiaire d'un galvanomètre balistique, on peut déterminer la charge Q qu'emmagasine le condensateur. *

$$Q = \int_0^T i dt$$

On appelle **capacité** du condensateur, le rapport entre la charge emmagasinée Q et la tension V de la pile d'alimentation.

$$C = \frac{Q}{V}$$

* i est le courant instantané de charge. Test le temps nécessaire pour que la charge soit terminée (environ 3 fois la constante de temps du circuit de charge). On sait que si Test assez petit, la déviation maximum du balistique fournit une mesure de Q.

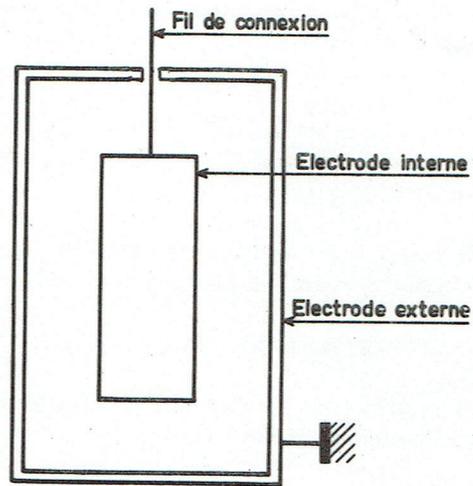


Figure 1

L'unité de capacité est le **farad**. C'est la capacité d'un condensateur qui emmagasine un **coulomb** lorsqu'on le relie à une source dont la tension est de un **volt**.

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}$$

La capacité d'un condensateur dépend :

- 1°) de la géométrie du condensateur
- 2°) de la nature du milieu isolant situé entre ses électrodes.

On appelle **constante diélectrique relative** * d'un isolant, le rapport entre la capacité **C** d'un condensateur à influence totale entièrement rempli de cet isolant et la capacité **C₀** qu'il possède lorsqu'il est vide.**

$$k = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

k est un nombre sans dimension, plus grand que un. Sa valeur dépend de la structure microphysique de l'isolant et de sa température.

I - 3 - CAPACITE ACTIVE D'UNE CELLULE DE MESURE

Le fil de connexion de l'électrode interne d'un condensateur à influence totale présente une self induction qui rend celui-ci d'autant plus inapte à des mesures en haute fréquence qu'il se rapproche davantage d'un condensateur à influence totale théoriquement parfait.

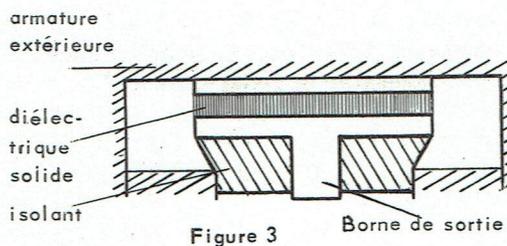
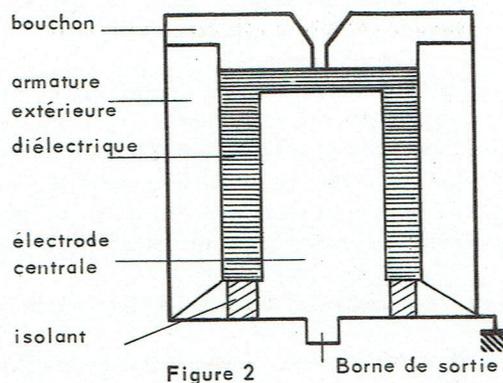
Les cellules de mesures diélectriques pour hautes fréquences ne sont donc pas des condensateurs à influence totale.

La cellule pour liquides type CS 601 est représentée schématiquement sur la figure 2 ci-contre.

Le diélectrique emplit toute la cellule.

La cellule pour solides type CS 701 est représentée schématiquement sur la figure 3.

Le diélectrique ne remplit qu'une partie de la cellule.



Soit **C** la capacité de la cellule avec le diélectrique et **C₀** la capacité de la cellule vide mesurée dans les mêmes conditions.

On se rend compte facilement que les capacités parasites présentées par les connexions reliant la borne de sortie de la cellule au capacimètre, s'éliminent de l'expression :

$$\Delta C = C - C_0$$

* Dans tout ce qui suit, le mot " relative " sera sous-entendu.

** L'air sec constitue une approximation suffisante du vide.

Par définition, la **capacité active** d'une cellule de mesures est une capacité C_a telle que :

$$\Delta C = (k - 1) C_a \quad (2)$$

Pour une cellule de mesures donnée, C_a est donnée par :

$$C_a = C'_a + C(k) \quad (3)$$

C'_a est la capacité de la partie de la cellule de mesure qui contient le diélectrique lorsque l'on remplace celui-ci par de l'air sec. C'_a est une **constante géométrique** de la cellule.

$C(k)$ est un terme correctif qui dépend de la constante diélectrique k de l'isolant que l'on mesure.

L'existence de ce terme correctif provient de la distorsion du champ électrostatique interne de la cellule par le diélectrique est est d'autant plus importante que k est plus élevé.

$C(k)$ est déterminé par étalonnage au moyen d'une série d'isolants de référence de constante diélectrique connue.

Démonstration de la formule (2)

En désignant par C''_a la capacité de la partie de la cellule qui ne contient pas le diélectrique, on a :

Cellule vide : $C_0 = C'_a + C''_a$

Cellule remplie : $C = k [C'_a + C(k)] + C''_a + C''_a(k)$

$C''_a(k)$ est le terme correctif dû à l'effet de la distorsion du champ électrostatique sur la capacité de la partie de la cellule qui ne contient pas de diélectrique. D'une manière évidente :

$$C''_a(k) = - C(k)$$

On voit que :

$$\Delta C = C - C_0 = k [C'_a + C(k)] - C'_a - C(k)$$

$$\Delta C = (k - 1) C_a$$

1 - 4 - CHARGES LIBRES ET CHARGES LIEES

Polarisation électrique

Soit C_0 et C les capacités d'un condensateur à influence totale respectivement vide et plein d'un diélectrique. Si V est la tension de la pile avec laquelle on charge le condensateur. les charges emmagasinées seront dans les deux cas :

$$Q_0 = C_0 V \quad \text{et} \quad Q = C V \quad \text{avec} \quad C > C_0$$

On peut écrire :

$$Q = Q_0 + Q_p$$

Q_p est la charge supplémentaire provenant de la présence du diélectrique ; on l'appelle : "**charge liée**" ou "**charge de polarisation**".

Q_0 est la " charge libre " du condensateur.

La charge Q_0 provient de la **création** ou de l'**orientation** sous l'influence du champ électrique, de dipôles microscopiques au sein du diélectrique. Ce phénomène est appelé : " La polarisation du diélectrique ".

Lorsque l'on décharge un condensateur, la charge Q_0 disparaît avec une constante de temps conditionnée seulement par la résistance du circuit de décharge. Mais la disparition de la charge Q_p ne peut que calquer fidèlement celle de la polarisation du diélectrique.

Le temps de disparition de la polarisation d'un diélectrique dépend de ses propriétés moléculaires et en particulier de sa viscosité interne. Il peut être beaucoup plus long que la constante de temps du circuit de décharge.

De cette inertie des mouvements des charges liées Q_p , résultent les pertes en haute fréquence d'un diélectrique.

II - COMPORTEMENT D'UN DIELECTRIQUE EN HAUTE FREQUENCE

II - 1 - DEFINITION DE $\text{tg}\delta$

On tient compte de l'inertie interne d'un diélectrique en attribuant à celui-ci une **constante diélectrique complexe**.

$$k^* = k' - jk'' \quad (4)$$

$j = \sqrt{-1}$ (base des nombres imaginaires).

Si un condensateur à influence totale, de capacité à vide C_0 est branché sur une source de tension alternative :

$$v = V e^{j\omega t}$$

On sait qu'il sera parcouru par un courant :

$$i = C_0 \frac{dv}{dt} = j\omega C_0 \cdot V e^{j\omega t}$$

Lorsque le condensateur est rempli d'un isolant de constante diélectrique k^* sa capacité devient d'après les formules (1) et (4) :

$$C = k' C_0 - jk'' C_0$$

Le courant i est alors :

$$i = (j\omega k' C_0 + \omega k'' C_0) V e^{j\omega t}$$

La tension v et le courant i sont les projections des vecteurs tournants \vec{V} et \vec{I} . \vec{I} possède une composante \vec{I}' qui tourne en phase avec \vec{V} et une composante \vec{I}'' qui est en quadrature avec \vec{V} (figure 4).

$$\text{On a} \quad |\vec{I}'| = \omega k' C_0 V$$

$$|\vec{I}''| = \omega k'' C_0 V$$

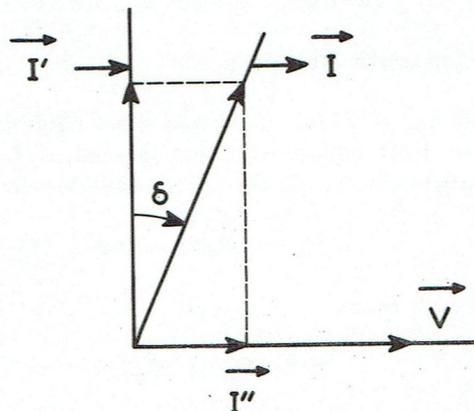


Figure 4

On appelle " angle de perte " d'un diélectrique l'angle δ que fait le vecteur \vec{I} avec sa composante I' en quadrature avec V .

On voit que :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I''}{I'} = \frac{k''}{k'} \quad (5)$$

II - 2 - SIGNIFICATION DE $\operatorname{tg} \delta$

La puissance dissipée en chaleur à l'intérieur du diélectrique est :

$$p = \overline{i'' \cdot v} = \omega k'' C_0 \cdot \overline{v^2} = \omega k'' C_0 \frac{V^2}{2}$$

A chaque période de la tension alternative appliquée, une quantité d'énergie w est dissipée.

$$w = p \cdot T = p \cdot \frac{2\pi}{\omega} = k'' \cdot C_0 \cdot \frac{V^2}{2} \cdot 2\pi$$

On sait d'autre part que l'énergie W stockée dans un condensateur chargé à la tension V est :

$$W = \frac{1}{2} C V^2$$

k'' est en général petit par rapport à k' et on a :

$$W = \frac{1}{2} k' C_0 V^2$$

On voit donc que :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{k''}{k'} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{w}{W} \quad (6)$$

Soit en langage clair :

$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi} \times$	Energie perdue en chaleur dans le diélectrique à chaque période de la tension alternative.	
	Valeur maximum de l'énergie électrostatique emmagasinée dans le diélectrique.	(7)

Pour des applications hautes fréquences, un condensateur sera donc d'autant plus mauvais que la $\operatorname{tg} \delta$ de son isolant sera plus grande.

On appelle " coefficient de qualité " d'un diélectrique, l'inverse de $\operatorname{tg} \delta$.

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} \quad (8)$$

II - 3 - CAS DES PERTES ELEVEES

Dans le cas où k'' n'est pas très petit par rapport à k' , on a :

$$W = \frac{1}{2} \sqrt{k'^2 + k''^2} \cdot C_0 V^2$$

On ne définit plus alors le coefficient de qualité du diélectrique par la relation (8) qui cesse d'être valable, mais par :

$$Q = 2\pi \frac{W}{w} \quad (9)$$

Comme on a toujours :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{k''}{k'} \quad (10)$$

On voit que :

$$Q = \frac{\sqrt{k'^2 + k''^2}}{k''} = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (11)$$

Les formules (9) et (10) sont les formules générales de définition du coefficient de qualité Q et de l'angle de pertes δ . La formule (11) est la formule générale reliant Q et $\operatorname{tg} \delta$. Lorsque $\operatorname{tg} \delta$ est petit, elle se réduit à la formule (8). Inversement on a :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\sqrt{Q^2 - 1}}$$

II - 4 - VARIATIONS AVEC LA FREQUENCE DE k' , k'' ET $\operatorname{tg} \delta$

Lorsque la fréquence tend vers zéro, k'' et $\operatorname{tg} \delta$ tendent vers zéro et k' tend vers la valeur k de la constante diélectrique statique.

Si le diélectrique ne possède pas de bandes d'absorption, k' , k'' et $\operatorname{tg} \delta$ conservent des valeurs à peu près constantes.

A la traversée d'une bande d'absorption, k'' augmente jusqu'à une fréquence F_c appelée **fréquence critique** de la bande d'absorption et diminue ensuite. k' diminue continuellement (figure 5). Il conserve ensuite la valeur atteinte à la sortie de la bande.

Dans tout le spectre hertzien, c'est à dire de quelques périodes par seconde à 300 GHz (onde de 1 millimètre), un diélectrique peut avoir jusqu'à quatre bandes d'absorption, chacune étant produite par un mécanisme moléculaire particulier. Les bandes d'absorption sont très larges et en général se recouvrent partiellement.

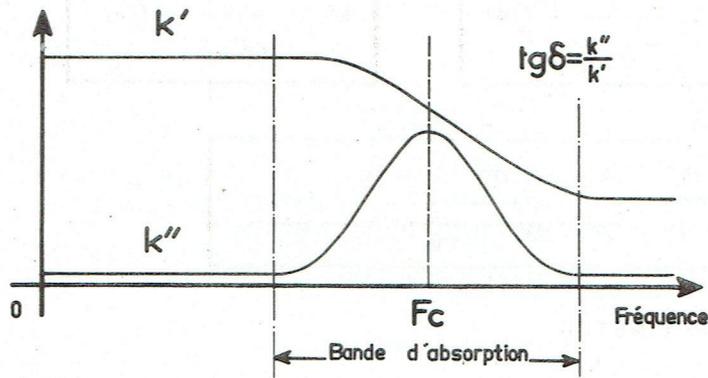


Figure 5

III - MESURE DE k' , k'' et $\text{tg}\delta$

III - 1 - PRINCIPE

La mesure de k' , k'' et $\text{tg}\delta$ s'effectue au moyen d'une cellule de mesure de capacité active C_a connue.

Il existe de nombreuses méthodes de mesure, mais elles se ramènent toutes à la détermination de la variation de l'admittance de la cellule lorsqu'on la remplit de diélectrique.

L'admittance de la cellule vide est :

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0$$

$$C_0 = C_p + C_a \quad (C_p = \text{capacité parasite}).$$

G_0 est proportionnel aux pertes à vide de la cellule. Si son isolement est bon $G_0 = 0$

Lorsque la cellule est pleine de diélectrique, sa capacité devient :

$$C = C_p + (k' - jk'') C_a$$

Son admittance devient donc :

$$Y = G_0 + j\omega (C_p + k' C_a - jk'' C_a)$$

$$\text{ou :} \quad Y = G_0 + \omega k'' C_a + j\omega (C_p + k' C_a)$$

La variation de l'admittance de la cellule est donc :

$$\Delta Y = Y - Y_0 = \Delta G + j\omega \Delta C$$

avec :

$$\Delta G = \omega k'' C \quad (12)$$

$$\Delta C = (k' - 1) C_a \quad (13)$$

On a donc :

$$k' = 1 + \frac{\Delta C}{C_a} \quad (14)$$

$$k'' = \frac{\Delta G}{\omega C_a} \quad (15)$$

Enfin :

$$\text{tg} \delta = \frac{k''}{k'} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\Delta G}{\Delta C + C_a} \quad (16)$$

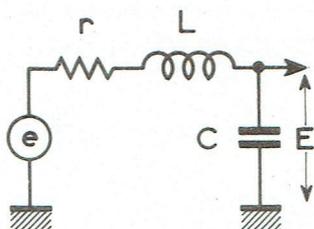
III - 2 - METHODE DU Q.METRE

Le Q.Mètre utilise la résonance série d'un circuit oscillant LC. L'appareil donne directement le rapport Q entre la tension E existant à la résonance aux bornes du condensateur et la tension d'injection e.

Les pertes sont en général réparties entre la bobine L et le condensateur C mais on peut à volonté les interpréter comme provenant :

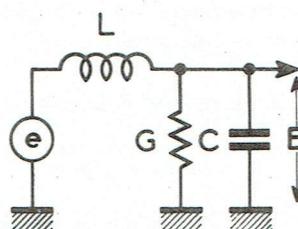
1°) soit d'une résistance r en série avec la bobine - Figure 6a

2°) soit d'une conductance G en parallèle sur le condensateur - Figure 6b



$$Q = \frac{E \cdot \omega L}{e \cdot r}$$

Figure 6 a



$$Q = \frac{E}{e} = \frac{1}{\omega L G}$$

Figure 6 b

La cellule de mesure est branchée aux bornes du condensateur de mesure.

On recherche la résonance, la cellule étant vide et on lit la valeur Q_0 du coefficient de surtension indiqué par l'appareil.

On remplit ensuite la cellule avec le diélectrique à mesurer et on lit :

- 1°) la valeur ΔC dont il a fallu diminuer le condensateur de mesure pour retrouver la résonance.
- 2°) la valeur Q plus petite que Q_0 indiquée alors par l'appareil.

On a :

$$\Delta G = G - G_0 = \frac{1}{\omega L} \left[\frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q} \right] = \frac{1}{\omega L} \cdot \frac{\Delta Q}{Q_0 \cdot Q}$$

Les valeurs de k' , k'' et $\text{tg} \delta$ sont donc données par les formules :

$$k' = 1 + \frac{\Delta C}{C_a} \quad (17)$$

$$k'' = \frac{1}{\omega^2 L C_a} \cdot \frac{\Delta Q}{Q_0 \cdot Q} \quad (18)$$

$$\text{tg} \delta = \frac{1}{\omega^2 L} \cdot \frac{1}{Q_0 \cdot Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta C + C_a} \quad (19)$$

Remarque - Pour déterminer la valeur du coefficient $\frac{1}{\omega^2 L}$, on débranche la cellule de mesure et tous ses accessoires et on lit la valeur Γ du condensateur de mesure qui assure la résonance.

On a alors :

$$\frac{1}{\omega^2 L} = \Gamma$$

et la formule à appliquer pour déterminer $\text{tg} \delta$ est :

$$\text{tg} \delta = \frac{\Gamma}{Q_0 \cdot Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta C + C_a} \quad (20)$$

III - 3 - NECESSITE D'UN APPAREILLAGE AUXILIAIRE

Le condensateur de mesure du Q.Mètre possède des pertes haute fréquence qui varient avec la position de son rotor. Ces pertes sont très faibles et elles sont sans influence sur la précision du Q.Mètre lui-même, mais on ne peut plus les négliger lorsque l'on désire mesurer des angles de pertes compris entre 10^{-4} et 10^{-3} .

C'est pourquoi il est nécessaire de placer en parallèle sur la cellule de mesure le condensateur micrométrique EM 202 A qui est conçu pour avoir des pertes indépendantes de la position de son électrode mobile. C'est ce condensateur que l'on fait varier pour obtenir la quantité ΔC . De cette manière, le condensateur du Q.Mètre reste fixe pendant toute la mesure et ses pertes s'éliminent de la différence ΔQ .

Enfin, le voltmètre du Q.Mètre possède une sensibilité insuffisante pour déterminer la valeur ΔQ correspondant aux faibles valeurs de $\text{tg} \delta$. On lui adjoint une position ΔQ qui joue le rôle d'une loupe.

L'exemple suivant fera mieux comprendre le rôle de ces éléments.

Soit le cas très fréquent d'un solvant organique ayant pour paramètres diélectriques :

$$k' = 2,5 \quad \text{tg} \delta \simeq 10^{-4}$$

avec la cellule à liquide CS 601 pour laquelle :

$C_a = 35$ pF, on aura :

$$\Delta C = (k' - 1) C_a \simeq 52,5 \text{ pF}$$

D'autre part, avec la bobine n° 8 du jeu de bobines étalonnées type M 621 B, on a, à 1 MHz par exemple :

$$Q_0 = 250 \qquad \Gamma \simeq 265$$

D'après la formule (20), on a :

$$\Delta Q \simeq Q_0^2 \cdot \text{tg} \delta \cdot \frac{\Delta C + C_a}{\Gamma}$$

soit :

$$\Delta Q \simeq 250^2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{87,5}{265} \simeq 2,06$$

Cette différence n'est pas mesurable sur le cadran du voltmètre du Q.Mètre directement sur l'échelle Q. En utilisant l'échelle ΔQ , il est possible d'apprécier de telles variations de Q.

ANNEXE 1

NOTATIONS ET SYMBOLES UTILISES

$$k = \frac{C}{C_0} = \epsilon = \text{permittivité relative ou pouvoir inducteur spécifique relatif.}$$

$$\text{permittivité absolue} = \epsilon_0 \cdot \epsilon = k \cdot \epsilon_0$$

Une étude plus approfondie démontre que " k " est une valeur complexe.

$$k^* = k' - jk''$$

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

$\text{tg } \delta$ = angle des pertes diélectriques.

k_1 = utilisé pour déterminer la capacité active de la coupelle pour échantillon pâteux.

Γ = capacité à la résonance **sans appareillage auxiliaire** sur le Q.Mètre.

C_0 = capacité à la résonance l'appareillage auxiliaire en place **sans échantillon** (à vide).

C = capacité à la résonance l'appareillage auxiliaire en place **avec échantillon**.

ΔC = variation de la capacité avec et sans échantillon mesurée avec le condensateur micrométrique pour retrouver la résonance.

Q_0 = coefficient de surtension **sans échantillon** l'appareillage en place.

Q = coefficient de surtension **avec échantillon**.

ΔQ = variation du coefficient de surtension due au diélectrique introduit.

d = diamètre de l'échantillon en mm.

e = épaisseur de l'échantillon en mm.

C_a = capacité active de la cellule.

$C_{a(lue)}$ = capacité active de la cellule pour solides type CS 701, indiquée sur le cadran en fonction de " e " pour " d " égal à 50 mm.

$C_{a(lue)}$ = pour " e " inférieur à 1,5 mm (voir figure 5).

$C_a(\text{réelle})$ = pour " d " inférieur à 50 mm = $C_{a(lue)} \cdot \frac{d^2 \text{ en mm}}{2500}$

$$C_a(\text{th}) = 7.10^{-2} \cdot \frac{d^2}{e}$$

$C_a(\text{mesurée})$ = C_a ou $C_{a(th)}$ corrigées par les abaques.

C_{ac} = capacité active calculée de la coupelle. $C_{ac} = \frac{C_1}{k_1 - 1}$

C'_a = capacité de la partie de la cellule qui contient le diélectrique.

C''_a = capacité de la partie de la cellule qui ne contient pas de diélectrique.

C_p = capacité parasite de la cellule.

ANNEXE 2

TABLE DES CONSTANTES DIELECTRIQUES DES PRINCIPAUX ISOLANTS USUELS

SOLIDES	f = 1 kHz		f = 1 MHz	
	k	tg δ en unités 10 ⁻⁴	k	tg δ en unités 10 ⁻⁴
Stéatite	5,98	5,7	5,97	0,8
Mycalex 400	7,45	2,5	7,40	1,7
Verre au plomb	6,7	4,5	6,65	1,8
Pyrex	4,97	11	4,84	7,4
Silice fondue	3,78	2	3,78	0,25
Bakélite HF	4,74	46	4,36	64
Plexiglass	3,12	150	2,76	50
Nylon	3,5	53	3,14	69
Polystyrène	2,56	0,2	2,56	0,27
Polythène	2,26	0,9	2,26	0,9
Téflon	2,1	1,4	2,1	0,95
Araldite	3,67	6,5	3,62	52
Mousse de polystyrène	1,03	<<1	1,03	<<1
Paraffine	2,25	1,1	2,25	1,1

LIQUIDES	k	Température
Hexane	1,890	20°
Cyclohexane	2,023	20°
Benzène	2,286	20°
Tétrachloréthylène	2,30	25°
Toluène	2,379	25°
Naphtalène	2,54	85°
Sulfure de carbone	2,641	20°
Trichloréthylène	3,42	16°
Ether éthylique	4,335	20°
Chloroforme	4,806	20°
Bromobenzène	5,40	25°
Fluorobenzène	5,42	25°
Chlorobenzène	5,621	25°
Acétate d'Ethyl	6,02	25°
Acide Acétique	6,15	20°
Aniline	6,89	20°
Phénol	9,78	60°
Pyridine	12,3	25°
Acétone	20,70	25°
Méthanol	32,63	25°
Nitrobenzène	34,82	25°
Acide formique	58,5	16°
Fornamide	109,5	25°