50376
1961
HH

50376
1961
44

UNIVERSITÉ DE LILLE

Laboratoire de Radioélectricité et d'Electronique

de la Faculté des Sciences de Lille

DIPLOME D'ÉTUDES SUPÉRIEURES

de Sciences Physiques

Sur différentes Méthodes de Mesure de la Permittivité Complexe dans la Bande Q

JURY *Président :* M. GABILLARD

Examinateurs : M. LEBRUN

M. WERTHEIMER

Présenté à Lille, le Juillet 1961

par M. de WAVRECHIN Régis, Licencié ès Sciences

A M E S P A R E N T S

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Radioéléctricité et Electronique de la Faculté des Sciences de Lille.

Nous tenons à remercier Monsieur le Professeur GABILLARD qui nous a accepté dans son Laboratoire.

Nous devons à Monsieur CONSTANT de nous avoir initié à la recherche et de nous avoir diriger avec beaucoup de bienveillance, de compréhension et d'autorité dans ce travail : nous lui exprimons nos sincères remerciements.

Nos remerciements vont encore à Monsieur le Professeur LEBRUN qui nous a toujours suivi avec intérêt au cours de cette étude.

Nous tenons à remercier également le personnel technique et spécialement Monsieur LEMESRE pour l'aide qu'il nous a apportée.

LILLE Juillet 1961.

Notations utilisées.

b susceptance réduite.

c vitesse de la lumière.

f fréquence de la source ; f_g fréquence dans le guide.

f_c fréquence de coupure (guide d'onde)

d = $\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2$ (guides d'ondes).

g conductance réduite.

m nombre entier pair.

n nombre entier impair.

s taux d'onde stationnaires.

L longueur, position d'une sonde (mesureur).
largeur au double du min. (mesure de T.O.S)

u composante circulaire d'une admittance, partie réelle.

v " " " " partie imaginaire.

x Loi de détection d'un détecteur.

y admittance réduite par rapport à une admittance caractéristique Y_c

y_x admittance réduite présentée dans le plan b b ; le plan b b sera le plan d'entrée de la cellule.

α partie réelle de la constante de propagation dans le guide.

β_g partie imaginaire de la constante de propagation dans le guide.

γ_g constante de propagation dans le guide $\gamma_g = \alpha + j\beta_g$

γ " " " non guidée.

$\Gamma = \rho e^{j\varphi}$ amplitude complexe du coefficient de réflexion (Γ_x : coeff de réfl dans b b).

η terme correctif généralement petit.

λ longueur d'onde λ_g longueur d'onde dans la guide $= \frac{2\pi}{\beta_g}$

ρ module du coeff. de réflexion Γ

φ phase " " " " $\Gamma = \rho e^{j\varphi}$

$\omega = 2\pi f$ fréquence circulaire

Pour une dielectrique, les paramètres précédents seront affectés de l'indice ' _

De plus :

A = partie imaginaire de l'indice complexe (
) Mode T E M
B = n partie réelle " " " (

h Hauteur en épaisseur de dielectrique dans la cellule de mesure.

k indice d'extinction.

n indice (partie réelle)

n^* indice complexe $n^* = n - jk$

δ angle de pertes $tg\ \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$

Δ phase de l'indice complexe $= \frac{k}{n} = \frac{A}{B}$

ε^* permittivité dielectrique complexe : $\varepsilon' - j\ \varepsilon''$ relative à

ε_o permittivité du vide.

ε^*_g permittivité dielectrique apparente dans le guide.

ε' et ε'' partie réelle et imaginaire de ε^*

r'' amplitude complexe de la réflexion air dielectrique.

- I -

INTRODUCTION

L'étude des variations de la permittivité complexe $\varepsilon' - j\,\varepsilon''$ d'une substance en fonction de la fréquence et de la température permet d'obtenir des renseignements sur la structure moléculaire de cette substance en particulier aux très hautes fréquences. Notre travail est relatif à la détermination des deux composantes ε' et ε'' pour des dielectriques liquides, aux longueurs d'onde voisines de 8 mm, à des températures comprises entre - 20° et 90° C -

Dans une première partie, nous précisons les propriétés - coefficient de réflexion et impedance d'entrée - d'un tronçon de guide court-circuité (cellule), rempli d'une épaisseur variable de dielectrique.

Dans une deuxième partie, nous indiquons comment l'association cellule de hauteur variable - ligne de mesure T.O.S permet de déterminer ε' et ε'' pour des tg δ supérieures à $5 - 10^{-3}$ - Nous précisons les réglages préliminaires nécessaires pour obtenir rapidement et avec une bonne précision ces deux facteurs.

Dans une troisième partie, un comparateur T hybride est utilisé avec une cellule de hauteur variable. Nous avons réalisé un montage très sensible permettant de mesurer pour des dielectriques à très faibles pertes (tg δ de quelques 10^{-4}) ε' avec une précision relative de 0,5 10^{-4} et ε'' à 10^{-2}

Nous donnons ensuite quelques résultats sur des solutions d'acide gras dans des solvants non polaires.

Les méthodes permettant de déterminer la permittivité complexe $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\,\varepsilon''$ d'un dielectrique aux ondes U - H - F sont très nombreuses. Les unes utilisent la propagation guidée ; d'autres plus récentes, la propagation à l'air libre. Le choix des méthodes dépend surtout de la fréquence à laquelle on travaille, de l'état du dielectrique, solide ou liquide, des pertes que celui-ci présente, et également du volume de l'échantillon disponible. Il est certain d'autre part, qu'aux fréquences très élevées (ondes millimétriques) des problèmes de réalisation mécanique se posent, et il faut en tenir compte.

Cependant, pour l'étude des dielectriques liquides à la fréquence considérée - 8 mm - il semble qu'il soit encore possible d'utiliser des montages en guide d'onde. Les méthodes de mesure décrites ici utilisent une section de guide d'onde (cellule) terminée par un court circuit, et remplie du dielectrique à étudier. La propagation guidée des ondes dans ce milieu est différente de celle du guide avec air. Il est possible, en mesurant le coefficient de reflexion présenté par la cellule, de determiner la constante de propagation γ'_g dans le dielectrique et d'en déduire les deux composantes ε' et ε'' de la permittivité.

I Relations liant la constante de propagation γ'_g à la permittivité complexe relative ε^*

La propagation libre dans un milieu dielectrique est de la forme

$$E' = E\, e^{-\gamma' z} = E\, e^{-\alpha' e z}\, e^{-j\beta' z} \quad \text{avec } \beta' = \frac{2\pi}{\lambda'}$$

En choisissant comme milieu de propagation le vide, on a :

$\gamma' = \gamma$, $\lambda' = \lambda$ et la vitesse de l'onde est celle de la lumière :

$$c = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

Pour les autres milieux dielectriques et pour une incidence normale

$$\gamma' = j\omega \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon^x \mu_0 \mu^x} \qquad (I,I)$$

et en ne considérant que les matériaux non magnétiques $\mu^x = I$, et en remplaçant ω par sa valeur

$$\gamma' = j\beta \sqrt{\varepsilon^x} \qquad (I,2)$$

Cette relation est valablepour les lignes coaxiales (mode T.E.M) et pour la propagation libre sous incidence normale.

Pour la propagation guidée, la réduction des équations de Maxwelles(mode T E_{01}) conduit à poser :

$$\gamma'_g = \gamma' \frac{\lambda'}{\lambda'_g} \qquad (I,3)$$ avec γ'_g et λ'_g les nouveaux paramètres de la propagations

Il est commode d'introduire une permittivité fictive ε^{x}_{g}

par analogie avec l'équation (I,2).

$$\gamma^{4}_{g} = j\,\beta_{g}\,\sqrt{\varepsilon^{x}_{g}} \qquad = j\,\beta_{g}\,\sqrt{\varepsilon'_{g} - j\,\varepsilon''_{g}} \qquad (I,4).$$

Par analogie avec l'équation de propagation libre où l'on a $n^{x} = \sqrt{\varepsilon^{x}}$, on peut aussi introduire un indice fictif $\sqrt{\varepsilon^{x}_{g}} = n^{x}_{g}$

On pose souvent :

$$j\,\sqrt{\varepsilon^{x}_{g}} = j\,n^{x}_{g} = A + j\,B \qquad (I,5).$$

A et B étant les deux composantes de l'indice fictif.

Dans ce cas, on a : $\gamma' g = \beta g\ (A + j\,B)$ (I,6).

C'est à dire :

$$\varepsilon' g = B^2 - A^2$$

$$\varepsilon'' g = 2\,A\,B \qquad (I,7)$$

On passe facilement à ε^{x} à partir de ces valeurs.

Il apparaît en effet à partir des équations (I,2),(I,3) ; (I,4)

$$\varepsilon' = \varepsilon'_g \quad (I - d) + d$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_g \quad (I - d) \qquad (I,8)$$

en posant $d = \left[\frac{f_c}{f}\right]^2$

d est entièrement déterminé lorsque la fréquence de la source est fixée et lorsque la longueur d'onde de coupure (dimensions géométriques du guide) est donnée ; on a $\lambda_c = 2b$

En pratique, pour obtenir la permittivité ε^x d'un dielectrique, il suffit de déterminer γ'_g d'où A et B , de passer ensuite à ε^x_g puis à ε' et ε''. Remarquons que si l'angle de perte tgδ est inférieur à 0,I,(on a $tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$) il est possible de déterminer ε' à partir d'une seule mesure de B c'est-à-dire de la longueur d'onde $\lambda'g$ du dielectrique. Dans le cas général,tgδ $>$ 0,I ; les informations sur ε' et ε'' sont imbriquées dans A et B.

Toutefois, aux ondes millimétriques tg δ est souvent inférieure à 0,I.

II - <u>Relation liant $\gamma'g$ au coefficient de reflexion Γ_x à l'entrée de la cellule</u>.

Dans le plan d'éntrée b b de la cellule (fig.I), définie par la surface

de séparation air - dielectrique, on peut définir un coefficient de réflexion Γ_x , puisque l'onde incidente est en partie réfléchie (présence d'un milieu autre que l'air) - Nous posons $\Gamma_x = p_x e^{j\varphi x}$

Les instruments de mesure que nous utilisons, ligne de mesure de T.O.S ou point comparateur (type T hybride symétrique) permettent de mesurer directement le module et la phase d'un coefficient de reflexion, c'est pourquoi il est intéressant d'exprimer Γ_x en fonction de γ'_g ; de Γ_x on pourra ensuite obtenir γ'_g d'où la permettivié ξ^x

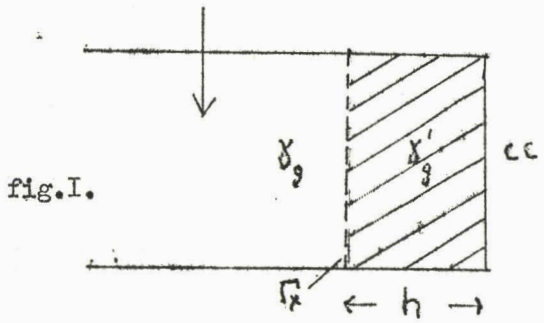


fig.I.

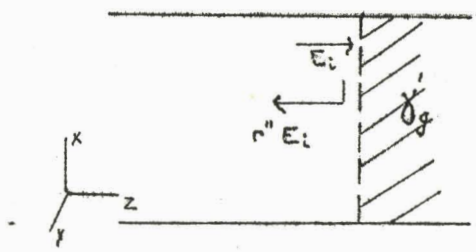


fig.2.

a) Réflexion air diélectrique à l'entrée de la cellule

Une réflexion partielle d'amplitude $r'' E_i$ se produit à l'entrée de la cellule, indépendamment de toute réflexion sur le court circuit terminal, l'admittence d'onde n'étant pas la même dans les deux milieux (Fig. 2) (I). Les équations de Maxwells permettent d'écrire la valeur des composantes du champ électromagnétique en un point quelconque du guide de transmission.

Avec E_i : champ incident au plan b b, (la transition est choisie pour origine),

on a : dans l'air $E_x = E_i\, e^{\gamma_g z} + r'' E_i\, e^{-\gamma_g z}$; $-j\omega\mu H_y = \gamma_g E_i e^{\gamma_g z} - r'' E_i e^{-\gamma_g z}$

donc $$\frac{E_{x_o}}{Hy_o} = \frac{j\omega\mu(1+r'')}{\gamma_g(1-r'')}$$

d'autre part

$$E_{x'} = E_i\,(1 - r'')\, e^{\gamma'_g z}$$

$$Hy' = \frac{\gamma'_g}{j\omega\mu} E_i\,(1 - r'')e^{\gamma'_g z} \qquad \text{donc} \quad \frac{E_{x'_o}}{Hy'_o} = \frac{j\omega\mu}{\gamma'_g}$$

les conditions aux limites pour des équations de Maxwells imposent :

$$r'' = \frac{1 - \gamma'_g / \gamma_g}{1 + \gamma'_g / \gamma_g} \qquad (I,9)$$

c'est à dire en faisant apparaître ε'_g et $tg\,\delta_{g'}$, et en supposant $tg\,\delta_g$ faible devant 1 :

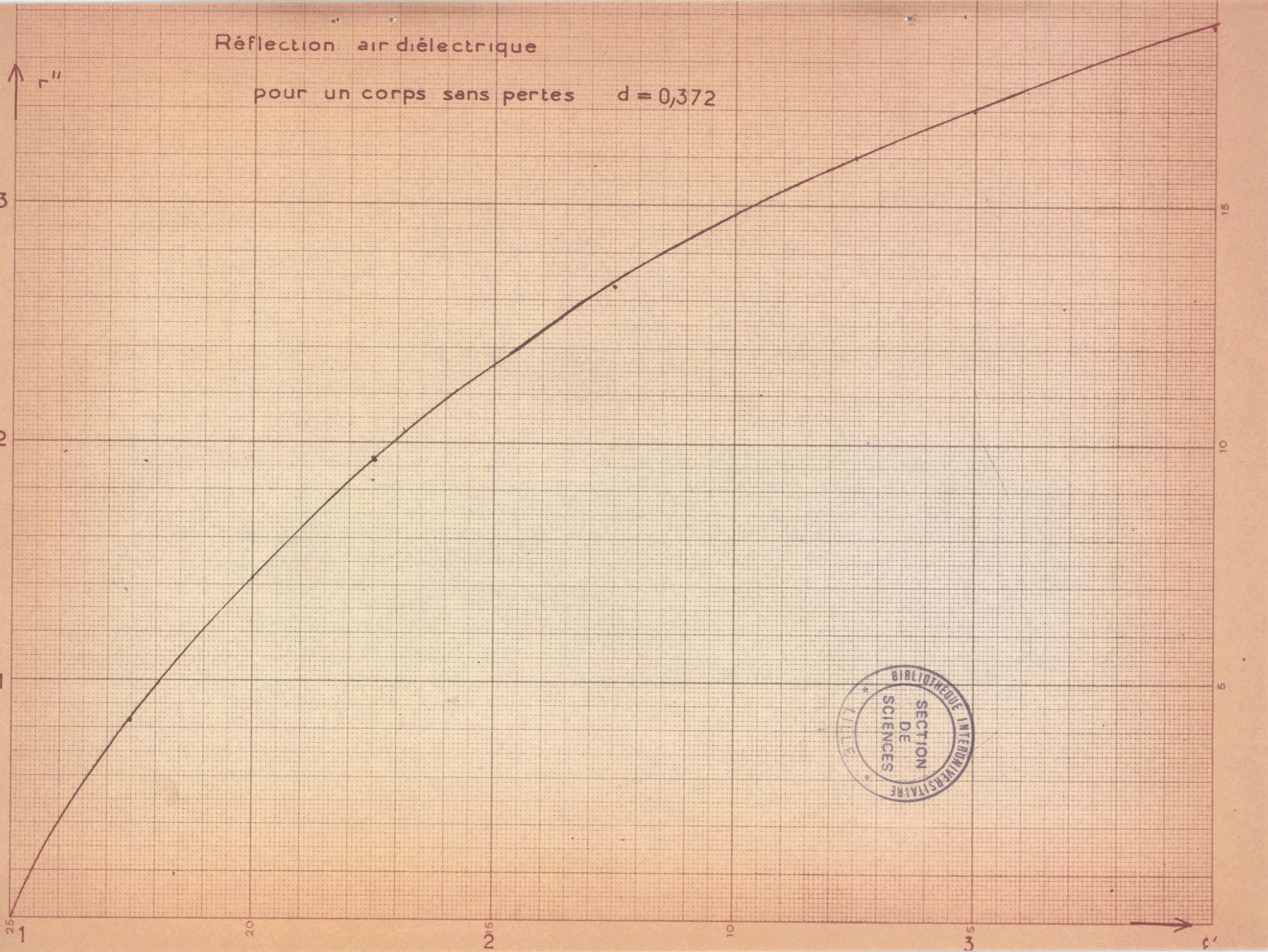
$$r'' = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon'_g}\,(1 - j\,tg\,\delta_g/2)}{1 + \sqrt{\varepsilon'_g}\,(1 + j\,tg\,\delta_g/2)} \quad \text{ou} \quad r'' = \frac{1 - B + j\,A}{1 + B - j\,A} \qquad (I,10)$$

on remarque notamment que pour un diélectrique sans pertes ($tg\,\delta_g = 0$; $A = 0$) ; l'amplitude de la réflexion r'' est :

(I) c'est à dire l'équivalent de l'admittance caractéristique pour une ligne coaxiales, on a dans l'air $y = \frac{\gamma_g}{j\omega\mu}$, dans le diélectrique $y' = \frac{\gamma'_g}{j\omega\mu}$

Réflection air diélectrique

pour un corps sans pertes $d = 0{,}372$



BIBLIOTHÈQUE INTERFACULTAIRE
SECTION DE SCIENCES

$$\frac{\sqrt{\varepsilon'_g} - 1}{\sqrt{\varepsilon'_g} + 1} = \frac{n_g - 1}{n_g + I} \qquad (I,II)$$

expression identique à celle obtenue en optique pour la réflexion d'une onde lumineuse tombant sous incidence normale sur la surface de séparation de l'air et d'un milieu non absorbant, d'indice de refraction $n = n_g$

b) Coefficient de reflexion total Γ_x

L'onde reflechie à l'entrée de la cellule est la somme de r" et d'une onde qui a subi des refelxions multiples entre le plan de la transition air-dielectrique - plan b b, et le plan court-circuit - plan cc - (fig 3).

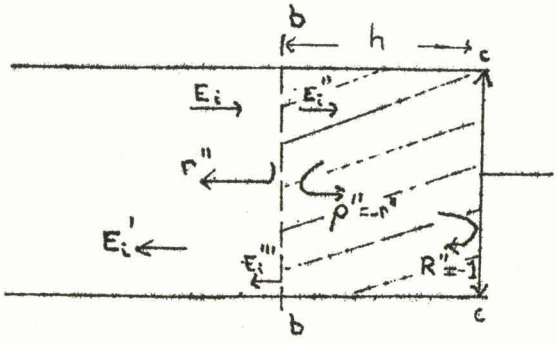


fig. 3

Ainsi, en utilisant les notations de la figure

$$E'_i = r'' E_i + E'''_i$$

E'''_i est la somme des ondes transmises dans l'air après avoir traversé le milieu dielectrique.

Le coefficient de reflexion à l'entrée de la cellule est ainsi :

$$\Gamma_x = \frac{E'_i}{Ei}$$

On a $E'''_i = E''_i \; e^{-2\gamma' gh} \; R''' (I - p'')$. R" est l'amplitude complexe du coefficient de reflexion du court circuit ; si le court circuit est parfait $R'' = \pm 1$, de plus $p'' = - r''$.

E''_i d'autre part est lasomme de toutes les ondes allant du plan(b b) vers le plan (c c). C'est une onde ayant subi en réalité une infinité de reflexion. SOn amplitude initiale était $E_i (1 - r'')$; à chaque parcours de la colonne de dielectrique elle subit deux reflexions, en même temps qu'une atténuation d'amplitudes $e^{-2\gamma' gh}$. L'onde résultante a pour valeur :

$$E''_i = E_i (1 - r'') + E_i (1 - r'') R'' p'' e^{-2\gamma' gh} + E_i (1 - r'') R'' p'' e^{-2\gamma' gh} R'' p'' e^{-2\gamma' gh} + \ldots\ldots\ldots$$

progression géométrique dont la somme est :

$$E''_i = E_i \; \frac{1 - r''}{1 - R'' p'' e^{-2\gamma' gh}}$$

On a donc :

$$E'_i = E_i \left[r'' + (1 - p'') R'' e^{-2\gamma' gh} \; \frac{(1 - r'')}{1 - R'' p'' e^{-2\gamma' gh}} \right] \qquad (I,I2)$$

et :

$$\Gamma_x = \frac{r'' - e^{-2\gamma' gh}}{1 - r'' e^{-2\gamma' gh}} \qquad (I,I3)$$

ou encore :

$$\Gamma_x = \frac{\gamma_g - \gamma'_g - (\gamma_g + \gamma'_g)\, e^{-2\gamma' gh}}{\gamma g + \gamma' g - (\gamma g - \gamma' g)\, e^{-2\gamma' gh}} \qquad (I,I4)$$

Expression dans laquelle γg, constante de propagation dans l'air, est déterminée par la fréquence de la source.

On peut avec cette équation calculer γ'_g lorsque la phase et le module du coefficient de refléxion Γ_x ont été mesurés.

Il est également possible de faire apparaitre l'admittance d'entrée y_x de la cellule, puisque l'on a :

$$y_x = \frac{1 - \Gamma_x}{1 + \Gamma_x}$$

c'est-à-dire en explicitant Γ_x et en faisant apparaitre les paramètres A et B,

$$(I,I5)\quad Y_x = \frac{B\,Sh\,2A\beta h - A \sin 2B\beta h}{Ch\,2A\beta h - \cos 2B\beta h} - j\,\frac{A\,sh\,2A\beta h + B \sin 2B\beta h}{ch\,2A\beta h - \cos 2B\beta h}$$

III - Détermination de γ'_g à partir de Γ_x

a) Conditions expérimentales favorables pour une détermination de γ'_g

Il existe des hauteurs de cellules favorables pour lesquelles une variation faible de γ'_g de la Cte de propagation dans le dielectrique donne une variation importante de Γ_x - quantité mesurée. Elles permettent d'obtenir γ'_g avec une meilleure précision.

Pour ces hauteurs privilégiées, le rapport $\frac{d\Gamma_x}{d\gamma'_g}$ est maximum.

Ces hauteurs sont solutions de l'équation suivante :

$$\frac{\delta^2 \Gamma_x}{\delta\gamma'_g \delta h} = 0 \qquad (I,I6)$$

Si la variation γ'_g n'est pas due à une variation de fréquence, on a :

$$\frac{\delta \Gamma_x}{\delta\gamma'_g} = 2 \; \frac{2\gamma'_g h - \mathrm{sh}\, 2\gamma'_g h}{\gamma_2 + \gamma'_g - (\gamma_g - \gamma'_g)_e - 2\gamma'_g h}$$

l'équation (I,I4) donne, si on exprime (I,I6) une expression dont la résolution exacte n'est pas simple dans le cas général. En supposant que les pertes sont faibles ($\gamma'g \neq j\beta'g$), l'expression sera vérifiée si les 2 égalités suivantes sont vérifiées :

$$\cos 2\beta'_g h = I$$

et c'est à dire $\operatorname{tg} 2\beta'_g h = 2\beta'_g h$

$$\sin 2\beta'_g h = 2\beta'_g h$$

dont les solutions sont $h = n\frac{\lambda'g}{4}$ et $h = m\frac{\lambda'g}{2}$, où n et m sont respectivement des nombres entiers impairs et pairs.

Pour $h = n\frac{\lambda'g}{4}$ $\quad \frac{\delta \Gamma_x}{\delta \gamma' g} = \frac{\pi}{\beta g}$

$h = m\frac{\lambda'g}{2}$ $\quad \frac{\delta \Gamma_x}{\delta \gamma' g} = \frac{\pi}{\beta' g}$

Or pour tout dielectrique autre que l'air, $\beta'g > \beta g$

d'où les solutions $h = \frac{n\lambda'g}{4}$

Il est ainsi recommandé, pour avoir une plus grande sensibilité, d'utiliser une cellule de hauteur $h = n\frac{\lambda'g}{4}$; (les hauteurs $h = m\frac{\lambda'g}{2}$ sont par contre très peu indiquées). On peut montrer graphiquement que les hauteurs $h = n\frac{\lambda'g}{4}$ sont encore les plus favorables dans le cas d'un dielectrique avec pertes.(I).

Pour ces hauteurs, il parait utile de préciser les propriétés du coefficient de réflexion à l'entrée de la cellule Γ_x et ce que deviennent les équations permettant de calculer $\gamma' g$ à partir d'une mesure de Γ_x

b) Propriétés particulières de Γ_x pour une cellule $h = \frac{n\lambda'g}{4}$

Posons : $\Gamma' = e^{-2\gamma' gh} = \rho' e^{j\varphi'}$

(I) Arnoult, Lebrun : Onde electrique - Mai I955 n° 338 p 449.

On a alors :

$$\Gamma_x = \frac{r'' - p' e^{j\varphi'}}{I - r'' p' e^{j\varphi'}} \qquad (I,I7)$$

La cellule étant de hauteur $h_n = \frac{n\lambda'_g}{4}$, on a $\varphi' = n\pi$ - Si la constante de propagation varie maintenant d'une quantité $d\gamma'_g$, φ' prend une valeur $\Delta\varphi'$ et il apparait une variation de phase correspondante de Γ_x, $\Delta\varphi_x$. On peut de cette façon définir une sensibilité de la cellule ; ce sera le rapport

$$\frac{\Delta\varphi_x}{\Delta\varphi'}$$

Comme en première approximation le module p_x reste constant, on obtient : lorsque - α' est nul

$$\frac{\Delta\varphi_x}{\Delta\varphi'} = \sqrt{\varepsilon'_g} \qquad (I,I8)$$

pour α' faible : $$\frac{\Delta\varphi_x}{\Delta\varphi'} = \sqrt{\varepsilon'_g}\ \frac{2p_x(1+\varepsilon'_g) + (\varepsilon'_g - 1)(p_x^2+1)}{4p_x\varepsilon'_g} \qquad (I,I9)$$

La sensibilité pour une mesure de phase dépend directement de la permittivité ε'_g du dielectrique considéré. L'erreur sur φ' due à une erreur sur la mesure de φ_x est ainsi généralement faible : on obtient la composante imaginaire β'_g de γ'_g - en première approximation ε' - avec une bonne précision.

Pour ces hauteurs de cellule, le coefficient de reflexion et l'admittance d'entrée ont des expressions simples.

$$x = \frac{1 - (B - j\,A)\,\mathrm{th}\; n\pi/2 \;\; A/B}{1 + (B - j\,A)\;\mathrm{th}\; n\pi/2 \;\; A/B} \qquad (I,20)$$

$$\varphi_x = \frac{2\;A\;\mathrm{th}\; n\pi/2 \;\; A/B}{1 - (B\;\mathrm{th}\; n\pi/2 \;\; A/B)^2} \qquad (I,2I)$$

l'admittance correspondant à $_x$ est alors $y_x = \dfrac{1 - \Gamma_x}{1 + \Gamma_x} = g_x + j\,b_x$

avec $$g_x = B\;\mathrm{th}\; n\frac{\pi}{2}\;\frac{A}{B} \qquad (I,22)$$

$$b_x = -A\;\mathrm{th}\; n\frac{\pi}{2}\;\frac{A}{B}$$

o) <u>Remarques sur les calculs à effectuer et sur la précision obtenue pour différents types de cellules.</u>

I) <u>Cellule de Hauteur fixe.</u> On détermine la permittivité du dielectrique introduit dans la cellule en mesurant Γ_x, c'est à dire g_x et b_x. Il faut ensuite en déduire A et B. Le calcul n'est pas très simple ; l'expression qu'il faut résoudre est en effet , (eq. I,I5) :

$$g_x + j\, b_x = \frac{-j}{\beta_g h}\, \beta_g h\, (A + j\, B) \coth \beta_g h\, (A + j\, B) \quad (I,23)$$

équation transcendante de la forme à coth α : il faut pour déterminer A et B utiliser un abaque.

Van Hippel et ses Collaborateurs ont déterminé ainsi la permittivité complexe d'un diélectrique, aux U H F - un abaque en α coth α a été établi par Lebrun, d'emploi commode : le lieu des admittances d'entrée pour une cellule de longueur H est une droite.

Il y a intérêt cependant, nous l'avons déjà dit plus haut; à utiliser une cellule dont la hauteur est $h_n = n \frac{\lambda'g}{4}$. A priori, on ne connait pas $\lambda'g$; il faut donc en général faire deux mesures : la première permet de déterminer $\lambda'g$ et de choisir en conséquence une cellule de hauteur convenable. Il est nécessaire d'autre part, au cours d'une série de mesures, de disposer de toute une gamme de cellules de hauteurs différentes.

2) Utilisation d'une cellule de hauteur variable. Pour rendre les calculs plus simples et les mesures plus rapides et plus précises, nous utilisons une cellule dont le plan du court-circuit, matérialisé par un piston introduit dans le guide, peut être déplacé et repéré en position.

A partir d'un réglége préliminaire des instruments de mesure (Chapitres

II et III) on peut obtenir automatiquement, avec une bonne précision les hauteurs de cellules multiples de $\frac{\lambda'g}{4}$. On peut ainsi déterminer les paramètres A et B directement, d'où une mesure de ε' et ε''. Cette cellule peut aussi être utilisée par toute une gamme de dielectrique.

Dans les chapitres suivants, nous indiquons comment, à partir d'une cellule de ce type, on peut déterminer la permittivité complexe d'un dielectrique liquide en utilisant successivement une ligne de mesure T.O.S et un point T hybride symétrique.

C H A P I T R E I I .

MESURE DE LA PERMITTIVITE DE DIELECTRIQUES LIQUIDES A PARTIR D'UNE LIGNE DE MESURE DE T.O.S ASSOCIEE A UNE CELLULE DE HAUTEUR VARIABLE.

I - METHODE DE MESURE.

a) Ligne de mesure T.O.S.

Elle est constituée d'une section de guide d'onde fendue suivant le grand côté. Une petite sonde est mobile le long du guide. Sa position est repérée (abcisse L) àpartir d'un micromètre. La tension induite proportionnelle au champ electrique, est détectée à partir d'un ensemble cristal-circuit accordé, au maximum du signal de sortie.

A l'extrémité du mesureur on place la cellule de hauteur variable (plan d'entrée b b) - fig II_I

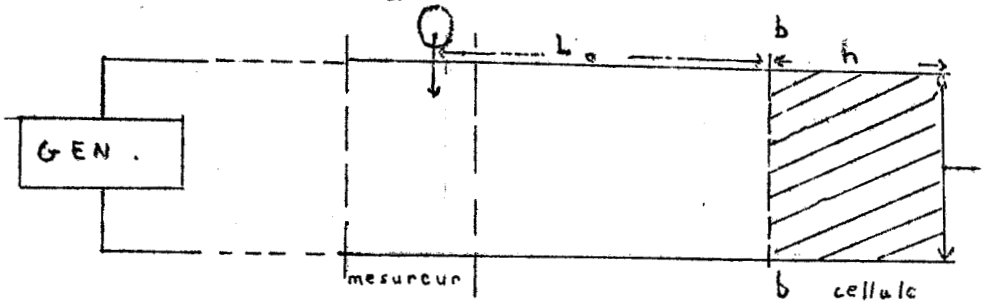


fig. II_I

A partir de l'indication du voltmètre on obtient 2 informations :

- amplitude minima et maxima du champ électrique : mesure du T.O.S $s = \sqrt{\frac{V\ max.}{V\ min.}}$ (detection quadratique) et du module ρ_x de Γ_x donné par $\rho_x = \frac{S - I}{S + I}$

- position d'une minimum : ceci permet de déterminer la phase de ρ_x

b) Principe de mesure de permittivité.

On a vu chapitre I page 13 l'intérêt d'utiliser des hauteurs de cellules multiples de $\frac{\lambda' g}{4}$ ($\lambda' g$ longueur d'onde dans le dielectrique) pour obtenir une précision maximum sur la mesure de la permittivité du dielectrique. La détermination de ces hauteurs s'obtient directement : il suffit de régler la soude à une position fixe L_0 (distance Sonde - plan b b de la forme : $l_o = n \frac{\lambda g}{4}$) et de faire varier la hauteur de cellule. Les hauteurs h pour lesquelles le signal est minimum à la sonde sont de la forme $h = h_n = \frac{n \lambda' g}{4}$. Cette relation rigoureuse si le dielectrique est sans pertes est encore sensiblement vérifiée (voir paragraphe suivant, p 20) si le dielectrique a des pertes.

A partir de hn mesuré, on a $\lambda' g$ (I) donc B

$$B = \frac{\lambda g}{\lambda' g} = \frac{n \lambda g}{4 h n} \quad (2,I)$$

(I) souvent par différence entre plusieurs hauteurs h_n de cellule.

Le coefficient de réflexion Γ_x pour les hauteurs h_n de cellule est alors donné par l'équation (I,22), (phase φ_x nulle) :

$$\frac{1 - p_n}{1 + p_n} = \frac{1}{Sn} = B \text{ th } \frac{n\pi}{2} \frac{A}{B} \qquad (2,2)$$

On effectue la mesure de Sn pour déterminer A.

- Le calcul des composantes ε' et ε'' de la permittivité à partir de A et B se fait alors rapidement au moyen des équations (I,7) et(I,8).

c) Corrections à introduire pour obtenir une détermination plus rigoureuse.

Les relations (2,I) et (2,2) ne sont qu'une première approximation lorsqu'il y a des pertes. Pour évaluer l'importance des approximations faites, en réalité il suffit de connaître les hauteurs de cellule exactes (toujours très voisines de $n \frac{\lambda' g}{4}$) qui donnent un signal minimum à la sonde, lorsque celle-ci est placée à la position 1_o - appelée souvent position " b = o ".

Le coeeficient de réflexion ou de la soude est égal à $-\Gamma_x$

Γ_x coefficient de réflexion à l'entrée de la cellule.

Le signal recueilli au mesureur a alors une amplitude proportionnelle à $(1 - \Gamma_x)$ - Ainsi, (éq I,I3) :

$$E = \frac{(I - r'')\ I + e^{-2\gamma' g h}}{I - r''\, e^{-2\gamma' g h}} = 2\,(B - jA)\,\frac{I + e^{-2\gamma' g h}}{(I + B - jA) - (I - B + jA)\,e^{-2\gamma' g h}}$$

Le signal detecte est $(E)^2$ - Les hauteurs exactes de cellules recherchées sont ainsi ; (min. de l'expression en $(E)^2$) :

$$h_n = n \frac{\lambda' g}{4} \left(1 - \frac{I}{n\pi} \frac{\Delta}{\coth u n + B(1 + \quad ^2)} \right) \text{ avec } \Delta = \frac{A}{B} \# \frac{tg\,\delta}{2} \quad (2,3)$$

Cette égalité peut s'écrire :

$$h_n = n \frac{\lambda' g}{4} (1 + \eta) \text{ où } \eta \# \frac{\Delta^2}{1 + B(1 + \Delta^2) n \pi \Delta} \quad (2,4)$$

(le calcul détaillé sera effectué dans une publication ultérieure, la thèse de E. Constant). On remarquera que le terme de correction η est d'autant plus important que Δ^2 est grand. Pour les pertes fortes cependant η reste faible.

En calculant le T.O.S. correspondant s_n présenté par la cellule, on a maintenant :

$$B \text{ th } A\beta h_n = \frac{I}{s_n} \left(1 + \frac{\Delta^2}{1 + s_n^2} \right) \text{(conductance de la cellule } g_x < 1 \text{)} \quad (2,5)$$

et

$$B \text{ th } A\beta h_n = s_n \left(1 + \frac{s_n \Delta^2}{1 + s_n^2} \right) \quad g_x > 1$$

où h_n est la hauteur de cellule corrigée.

Il faut noter que le facteur de correction introduit ainsi dans l'équation (2,2) augmente comme Δ^2 et peut devenir important : c'est un terme en quelques $2.\,10^{-2}$ pour $tg\,\delta = 0,2$. Mais pour $tg\,\delta < 10^{-2}$ il reste en général toujours faible si $g_x < 1$. Il suffit pour cela de choisir correctement la hauteur de cellule en fonction des pertes du diélectrique.

d) <u>Erreurs sur ε' et ε'' dues aux approximations effectuées</u>

L'erreur sur ε'_{eq} est, à partir de l'équation (I,7) :

$$\frac{\Delta \varepsilon'}{\varepsilon'_{\text{réel}}} \leqslant \frac{tg^2\,\delta}{2}$$

La valeur réelle de ε' est plus faible que celle effectivement mesurée sans corriger les hauteurs h_n de la cellule. De fait, les dielectriques les plus souvent étudiées ayant $tg\,\delta < 10^{-2}$, l'erreur commise sur ε' est inférieure à $0{,}5.\ 10^{-4}$

Sur ε'', on obtient :

$$\frac{\Delta \varepsilon''}{\varepsilon''_{réel}} \leqslant \frac{tg^2\delta}{2}$$

C'est également une erreur très faible pour la majorité des corps étudiés.

Lorsque les pertes du dielectrique sont fortes cependant, la précision sur ε' et ε'' ne diminue pas considérablement comme il semble à priori. Il faut tenir compte de l'effet compensateur intervenant sur le terme de correction des hauteurs de cellule.

e) Conclusion .

Les mesures de permittivité complexe de dielectrique, dans le domaine des ondes U. H. F peuvent s'effectuer très rapidement à partir d'une cellule de hauteur variable et d'un mesureur. Il suffit après un réglage préliminaire de la sonde du mesureur a " b = o " de relever les hauteurs de la cellule donnant un signal minimum et la valeur des T.O.S correspondants . On peut alors déduire directement sans abaque les deux composantes A et B.

Quelques approximations sont introduites pour $tg\ \delta > 10^{-2}$. Néanmoins pour la plupart des diélectriques étudiés, les pertes présentées, à la longueur d'onde 8 mm, sont suffisamment faibles pour que l'erreur due à ces approximations soit souvent négligeable à la précision de nos mesures.

II : DESCRIPTION DU MONTAGE UTILISE.

Nous avons réalisé le montage suivant :

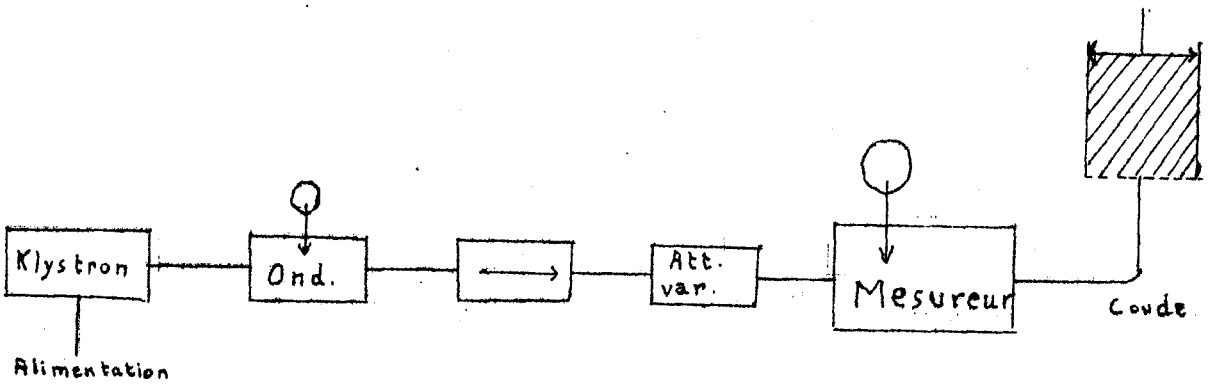


fig. II 2

La source est un klystron L T T K 192 ; longueur d'onde centrale $\lambda = 8{,}60$ mm.

L'ondemètre également de fabrication L T T a un coefficient de qualité d'environ 4000. Il est directement étalonné en fréquence et permet de déceler des variations de l'ordre de $2.\ 10^{-4}$

- L'isolateur à ferrites découple la charge de la source et assure ainsi une bonne stabilité de fréquence. On place cependant un atténuateur, pour améliorer ce découplage et permettre également de régler l'énergie incidente à un niveau convenable.

- La soude du mesureur (L T T) est ici à enfoncement fixe, et ses déplacements sont repérés au $I/_{100}$ mm.

La cellule de mesure est placée à la sortie du mesureur et un coude plan E permet de l'orienter à la verticale. On assure de cette façon une meilleure étanchéité et on évite que les bulles d'air ne se forment et genent les mesures lorsque le dielectrique est introduit.

Cellule de mesure (fig.II_3)

Elle est constituée d'un tronçon de guide fermé d'un côté par une fenêtre de mica ; de l'autre côté par un piston de court-circuit qu'il est possible d'enlever pour effectuer le remplissage de la cellule. Ue piston est fixé à un axe central solidaire d'une tête micrométrique (lecture au $I/_{100}$mm) : on peut ainsi le déplacer et repérer sa position. Les mouvements du liquide son pos sibles à partir d'une rainure pratiquée suivant le petit côté du piston.

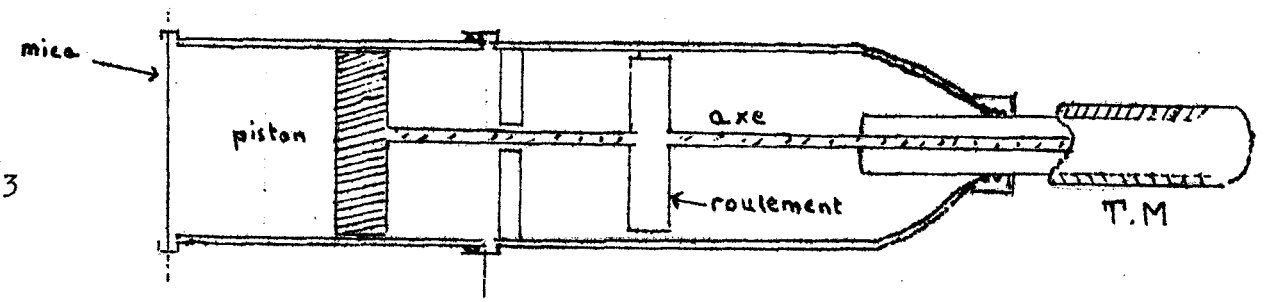


fig. II 3

Les pertes à vide de la cellule à vide ont été réduites au minimum en utilisant du guide dont la surface interne est argentée (ceci protège également contre l'attaque des parois par les solutions d'acide), et en soignant la qualité des contacts entre le piston court-circuit et les parois de la cellule.

Nous avons étudié plusieurs types de piston :

- piston à grande surface latérale de contact. Ses qualités changent après un usage prolongé, le contatc ne se faisant plus régulièrement (Fig II$_4$)

- piston à piège. Ses performances dependent de la permittivité du dielectrique introduit dans la cellule, et il est donc impossible de l'utiliser pour une série de mesures. Nous avons fait quelques essais avec un piston de ce type construit pour être utilisé avec les dielectriques de permittivité $\varepsilon' = 2{,}2$ - corps très fréquemment rencontrés. La réalisation mécanique étant très délicate, les résultats n'ont pas été très satisfaisants (fig II$_5$)

Nous préférons donc opérer avec un piston " à lèvres", le contact se fait sur une surface réduite, ce qui diminue les irrégularités. Il suffit, après usage prolongé, d'écarter les lèvres pour que le piston retrouve sa qualité primitive ($S > 100$) fig II$_6$)

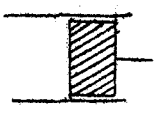
fig.II$_4$ 

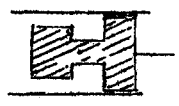
fig.II$_5$ 

fig.II$_6$

III MODE OPERATOIRE.

Il faut initialement placer la soude à la position convenable. La longueur d'onde λ_g dans l'air étant connue, la cellule vide est réglée à une hauteur multiple de $\frac{\lambda_g}{4}$, ($b_x = o$). Elle est ensuite montée à l'extrémité du mesureur et on recherche la position de sonde pour laquelle l'amplitude du système d'onde stationnaire établi est minimum. La sonde est fixée à cette position.

Le dielectrique est ensuite introduit dans la cellule :

- on détermine les hauteurs h_1, h_3; h_5 ..... de celle-ci pour lesquelles le Signal à la sonde est minimum.
- On mesure également les T.O.S correspondants présentés par la cellule S_1, S_3, S_5.... Ces deux mesures permettent d'obtenir la permittivité complexe (voir paragraphe I_b).

Il est utile de préciser que le réglage de la sonde est à recommencer si la fréquence du klystron varie ou si la fenêtre en mica placée dans le plan d'entrée de la cellule est changée. Dans tous les autres cas, on peut faire très rapidement une série de mesure sur des dielectriques différents .

IV - CAUSES D'ERREURS ET INFLUENCE DES DIVERS ELEMENTS DU MONTAGE.

a) Erreur due à une variation de fréquence.

Un glissement de fréquence peut éventuellement se produire lorsque le découplage entre le klystron et la cellule est insuffisant. Il faut utiliser une cellule de hauteur faible placée le plus près possible du mesureur.

Dans le montage que nous utilisons, les réalisations mécaniques nous imposent une distance minimum entre cellule et mesureur - présence du coude -; et l'erreur sur la position de la sonde peut facilement être de $1/100$ mm pour une très petite variation de fréquence. Aussi faut-il contrôler souvent à l'ondemètre la fréquence au cours d'une série de mesures.

b) Erreurs dues au mesureur.

L'erreur due à la profondeur de la sonde est négligeable (sonde fixe).

L'erreur est due, par contre, au relevé de la position d'un minimum - réglage à b = o - ; nous sommes limités par la précision du mesureur. Il y a

de ce fait une erreur Δh sur la valeur des hauteurs h_n particulières de la cellule obtenues au cours d'une mesure de permittivité. Entenant compte uniquement de la différence des hauteurs h_n, dependant, il est possible de réduire sensiblement l'importance de cette erreur dans le calcul de λ'_g.

Il est intéressant de calculer quelle peut être la valeur Δh lorsque la position d'un minimum est repérée avec le mesureur avec une précision maximum de $\Delta y = \frac{0,5 \text{ mm}}{100}$. On a alors, en effet, sur la phase du coefficient de réflexion Γ_x une erreur $\Delta \varphi_x = \frac{4\pi \Delta y}{\lambda g}$

Si le dielectrique a de très faibles pertes et une permittivité ε'_g, l'erreur correspondante sur φ', phase de Γ', est :

$$\frac{\Delta \varphi x}{\Delta \varphi'} = \sqrt{\varepsilon'_g} \quad \text{avec} \quad \Delta \varphi' = \frac{4\pi \Delta h}{\lambda_g} \sqrt{\varepsilon'_g}$$

Donc $$\frac{\Delta y}{\Delta h} = \varepsilon'_g \qquad (2,6)$$

La détermination des hauteurs de cellule est plus précise si le dielectrique a une permittivité ε'_g élevée. Pour $\varepsilon'_g \# 2$, $\Delta h = 1/100$ mm.

c) Erreur due à la loi de detection du cristal.

Nous utilisons des cristaux L T T dont la loi de détection est quadratique (X = 2), si l'amplitude du signal est faible (inférieure à 3mV i.V) . L'emploi de l'attenuateur permet de satisfaire cette condition, même si le T.O.S mesuré est important.

Une erreur commise sur la loi de détection dx réduirait la précision obtenue sur une mesure de s

On a en effet, (si x ≠ 2) : $\frac{ds}{S} = \frac{\text{Log } S}{2} dx$

L'erreur est d'autant plus grande que le T.O.S est grand (mesure directe du rapport $\frac{V\ Max}{V\ Min}$)

d) Erreurs dues à la présence du coude.

Le coude utilisé, en guide d'onde 8 mm, présente un T.O.S de I,09 lorsqu'il est suivi d'une charge adaptée : les réflexions parasites qu'il introduit ne sont pas négligeables, il faut les ajouter vectoriellement à la réflexion Γ_x produite par la colonne de dielectrique. Il en résulte des erreurs $\Delta\varphi$ et $\Delta\rho$ sur la détermination du module et de l'argument de Γ_x.

Détermination de $\Delta\rho$ et de $\Delta\varphi$.

Nous supposons que la réflexion Γ_c due au coude est localisée dans

un plan c c : dans ce plan $\Gamma_c = S_{11} e^{j\varphi c}$ (fig.II$_7$) _ La mesure directe coude -charge adaptée étant peu indiquée _ T.O.S de la charge adaptée I,03 - , ilest préférable d'utiliser une variante de la "methode des tangentes".

Un piston de court-circuit est placé immédiatement derrière le coude. On relève les positions y_2 d'un minimum avec la soude du mesureur pour diverses positions y_I du piston.

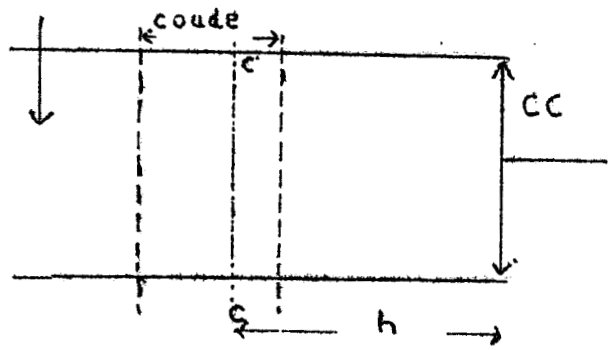


Fig.II 7

La différence $y_2 - Y_I$ a été portée sur la courbe ci-contre (Courbe II). Cette courbe permet d'obtenir l'erreur $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi$, sur une mesure de phase en fonction de $\varphi_c - \varphi_I$, position du coude par rapport au plan du court-circuit ; c'est également l'erreur sur la position d'un minimum : on a :

$$\varphi_2 - \varphi_I = \frac{4\pi\Delta y}{\lambda_g} \qquad \text{et} \quad \varphi_c - \varphi_I = \frac{4\pi y_1}{\lambda_g}$$

Cette courbe permet également de déterminer l'influence du coude sur une mesure de T.O.S. Le coefficient de réflexion dans le plan c c serait en effet s'il n'y avait pas de réflexion parasite : $\Gamma = e^{-2\gamma_g h} = \rho\, e^{j\varphi}$ ($\rho \neq 1$) ; mais en réalité on a dans ce plan $\Gamma_m = \rho_m\, e^{j(\varphi + \Delta\varphi)}$

Si S_{11} est faible, on obtient (éq. I,17) :

$$\Gamma_m = S_{11}\, e^{j\varphi_c} + \Gamma$$

c'est à dire :

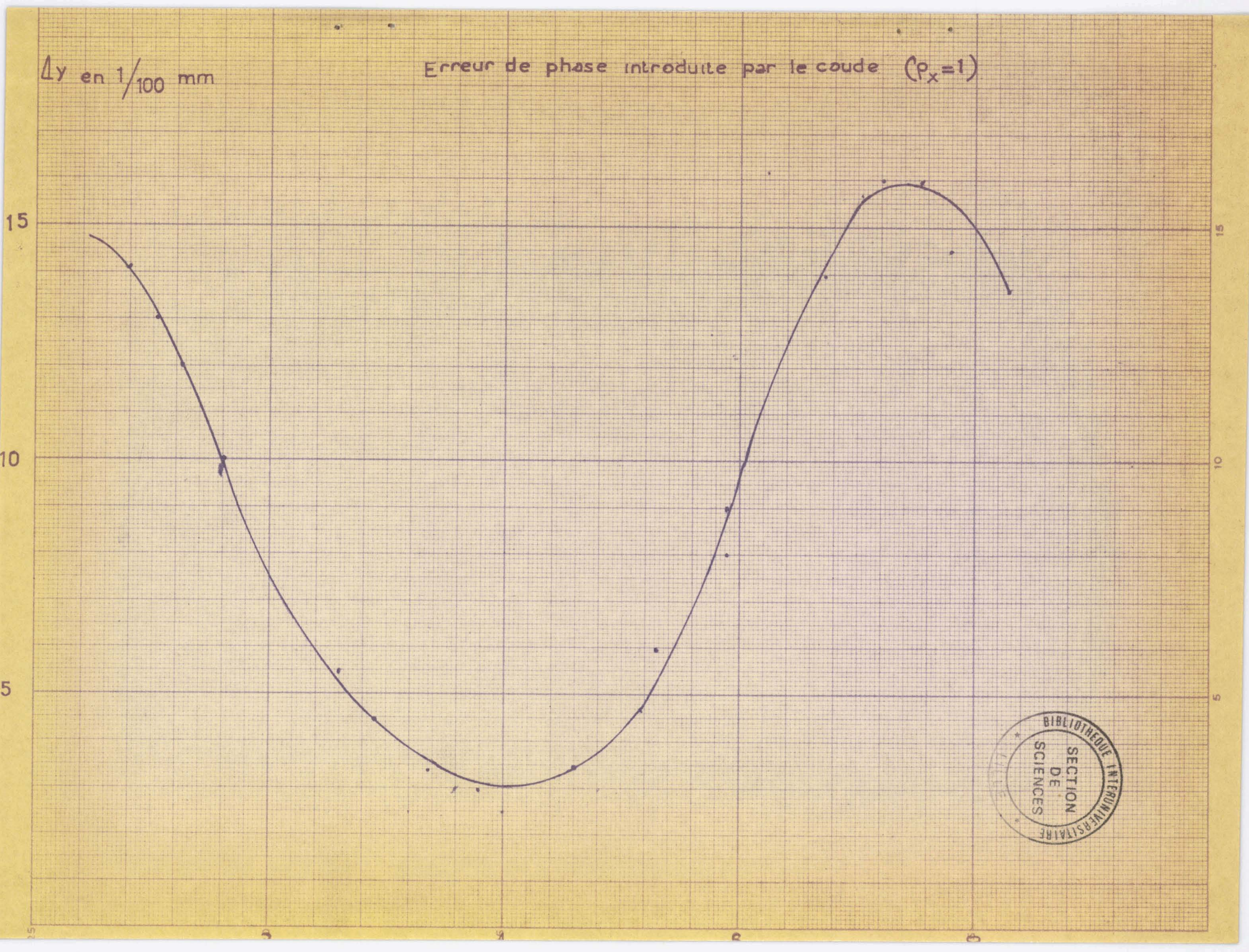
$$\rho_m\, e^{j(\varphi + \Delta\varphi)} = S_{11}\, e^{j\varphi_c} + \rho\, e^{j\varphi}$$

Comme $\Delta\varphi$ est faible, on a :

$$\Delta\varphi = \frac{S_{11}}{\rho_m} \sin(\varphi_c - \varphi)$$

$$\Delta\rho = S_{11} \cos(\varphi_c - \varphi) \quad \text{en posant } \Delta\rho = \rho_m - \rho$$

La position du coude (plan c c) par rapport au plan d'entrée de la cellule (b b) est très importante : l'erreur introduite par le coude peut être plus importante sur la phase, ou sur le module du coefficient de réflexion mesurée. Différents essais avec des tronçons de guide de longueur différente placés entre la cellule et le coude permettent de se régler sensiblement à $\varphi_c - \varphi = \frac{\pi}{2}$ de telle sorte que l'erreur sur ρ_x soit minimum.



BIBLIOTHÈQUE INTERUNIVERSITAIRE
SECTION DE SCIENCES

La quantité $\Delta\varphi$, nous l'avons indiqué plus haut, introduit une erreur sur une position de coude. Cela peut limiter la précision sur les hauteurs h_n de cellules, pour une mesure de permittivité - par exemple si $\varepsilon'_g \neq 2$ Δh est de l'ordre de $\frac{3 \text{ mm}}{100}$. Néanmoins l'erreur réellement commise est beaucoup plus faible, car la mesure est effectuée à phase constante, les hauteurs h_n étant déterminées pour une même position de coude.

e) Erreurs dues au mica.

De même que le coude, le mica mis dans le plan d'entrée b b de la cellule introduit des pertes et un certain dephasage. Puisqu'on travaille à phase constante _ sonde réglée à b = o - , le mica est toujours fixé dans un maximum de tension, au moins pour les corps à faibles pertes, et l'erreur introduite est sensiblement constante. A titre indicatif, le minimum pour b = o, avec le mica utilisé (épaisseur 40 μ) se déplace de $16/100$ mm.

Mais pour en tenir compte, il suffit de déterminer la position convenable de la sonde lorsque le mica est en place. C'est un avantage de la cellule à hauteur variable ; il serait plus difficile de faire une correction avec une cellule de hauteur fixe.

Les pertes introduites étant faibles sont difficiles à mesurer ; rigoureusement même, il faudrait introduire un coefficient de réflexion localisé du au mica. Dans le cas qui nous intéresse _ mesure à phase constante _ il est plus

simple de les assimiler aux pertes d'insertion ou pertes à vide de la cellule.

Pour avoir une plus grande sécurité, un mica de 20 μ a également été placé dans le plan d'entrée du coude. Mais il est possible d'en tenir compte de la même façon que pour le premier mica ; un effet compensateur pouvant d'ailleurs se produire si le mica est placé sensiblement à $n \lambda g/4$ du premier

f) Erreurs dues aux pertes à vide de la cellule.

La cellule vide ne présente pas un T.O.S infini ; il faut en tenir compte dans la détermination du coefficient de réflexion Γ_x

Considérons, pour cela, les pertes présentées par la cellule remplie : $u_n = \frac{I}{S_n} = \frac{I - \rho n}{I + \rho n}$, et les pertes présentées par la cellule vide $u_v = \frac{I}{S}$

Les pertes réelles introduites par la colonne de dielectrique sont obtenues par la différence $u_n - u_v$. Aussi les pertes d'un dielectrique, quand elles sont faibles, tout au moins telles que $u_n < 2 u_v$, notamment pour les solvants non polaires souvent utilisés, ne peuvent pas être , en réalité, étudiés car la détermination des pertes à vide u_v est peu précise. (T.O.S. élevé).

Il est généralement préférable de considérer en conséquence, pour une mesure sur des solutions de corps polaires dans des solvants non polaires, les pertes du solvant comme étant les pertes à vide de la cellule.

La cellule utilisée présente un T.O.S à vide voisin de I8 ; avec le Benzène et la plus grande hauteur de cellule, on obtient s ~~I1~~ I0. L'erreur sur la détermination des pertes du benzène est ce cette façon de l'ordre de 8°/$_o$.

La précision est supérieure à 0,5 °/$_o$ si le T.O.S présenté par la cellule est inférieur à 2.

g) Sensibilité des mesures.

On peut commettre une erreur assez importante sur la détermination des hauteurs h_n si le T.O.S présenté par la cellule est voisin de I. La sensibilité est en effet mauvaise , le minimum à la soude est peu prononcé.

Un choix convenable des hauteurs de cellule permet d'éviter ces inconvéhients - h_n est déterminé avec une précision de l'ordré du centième de mm, lorsque les T.O.S considérés sont supérieurs à I,3.

V.PRECISION FINALE SUR ε' et ε''

Précision obtenue sur ε'

Elle dépend seulement, en définitive, de la précision obtenue sur le pointé des hauteurs h_n : le terme correctif A^2 introduit dans l'équation (I,7) pour traduire l'existence de la composante imaginaire de la mermittivité est en $I0^{-5}$, pour tg δ < $I9^{-2}$

Si h_o est la profondeur totale de la cellule, on obtient donc :

$$\frac{\Delta \varepsilon'_g}{\varepsilon'_g} \# \frac{2\,\Delta h}{h_o} \qquad \text{ainsi} \qquad \frac{\Delta \varepsilon'}{\varepsilon'} \# 2\,(I - d)\,\frac{\Delta h}{h_o}$$

L'importance de la précision finalement obtenue sur la détermination de ε'_g dépend directement de la hauteur h_o.

La cellule utilisée avait une profondeur maximum $h_o = 85$ mm, $d = 0{,}372$. En tenant compte des causes d'erreur déjà indiquées, on obtient sur ε' un précision de $2.\ 10^{-3}$ si $tg\ \delta < 2.\ 10^{-2}$.

Pour des diélectriques ayant des pertes supérieures, la précision décroit rapidement (10^{-2}).

Précision sur ε''

Elle est surtout limitée par la précision obtenue sur la détermination du paramètre A, c'est - à- dire sur une mesure de T.O.S.

Pour $tg\ \delta > 5.10^{-3}$, la précision maximum sur ε'' est de l'ordre de $2.\ 10^{-2}$. Si $tg\ \delta < 5.10^{-3}$, la précision diminue ; on ne peut plus mesurer les pertes avec une précision suffisante si $tg\ \delta < 10^{-3}$

CONCLUSION

L'utilisation d'une cellule à h variable associée à un mesureur permet la détermination rapide et précise de permittivité d'un diélectrique dans la bande Q .

Les paramètres A et B se déduisent directement à partir des quantités mesurées et les erreurs systématiques, dues aux instruments de mesure, sont réduites (mesure à phase constante).

Néanmoins, lorsque le dielectrique à étudier présente de très faibles pertes ($tg\ \delta < 5.10^{-3}$) - cas des solutions très diluées de corps polaires dans des solvants non polaires _, le montage utilisé manque de sensibilité et nous préférons utiliser un montage comparateur à partir d'un T hybride. Ce montage est décrit dans le chapitre III.

LILLE

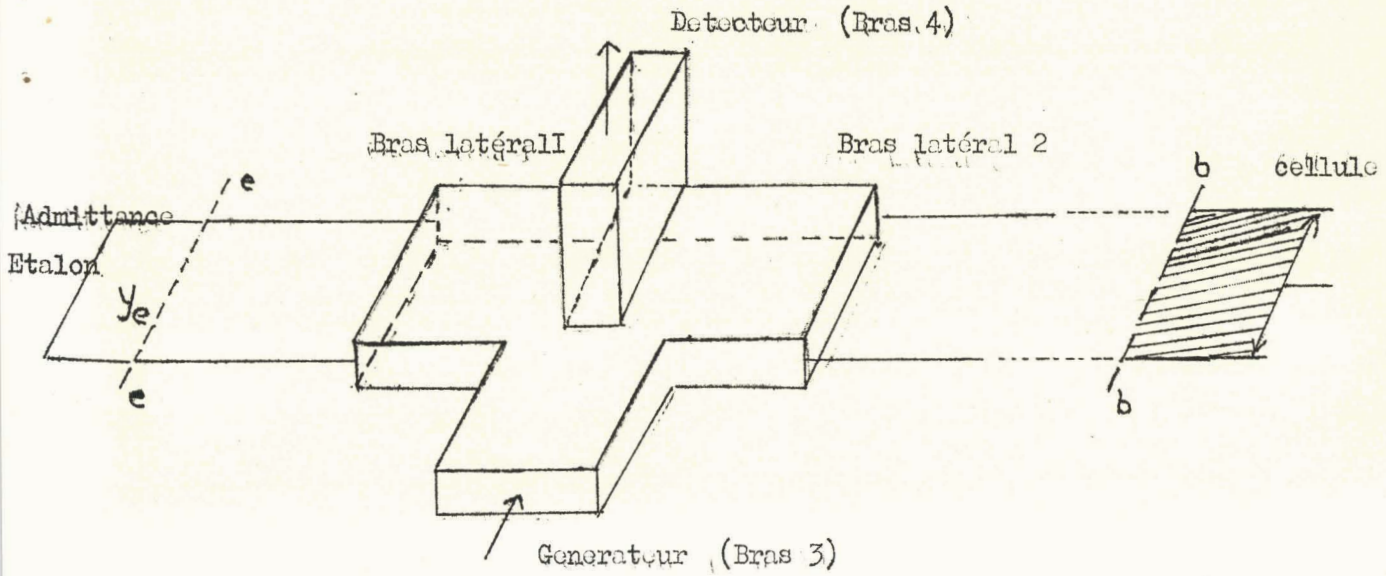
C H A P I T R E I I I .

DETERMINATION DE LA PERMITTIVITE DE DIELECTRIQUES LIQUIDES A PARTIR D'UNE CELLULE DE HAUTEUR VARIABLE ASSOCIEE A UN PONT.

I. Principe de la mesure de permittivité avec un pont.

a) Utilisation d'un T hybride symétrique en comparateur.

Un T hybride est constitué par l'assemblage de 2 jonctions placées respectivement dans les plans E et H, selon le schéma ci-dessous :



Le bras 3 est relié à la source et le bras 4 porte l'ensemble détecteur. Entre ces 2 bras, le T étant symétrique, il n'y a pas de couplage direct.

Appelons E_{s4} le signal sortant de la branche 4. Si l'on met dans les deux bras latéraux des admittances de coefficient de réflexion $\Gamma_I = \rho_1 e^{j\varphi_1}$, et $\Gamma_2 = \rho_2 e^{j\varphi_2}$, à partir de la théorie de T, on peut calculer l'amplitude du signal appliqué au détecteur :

$$E_{S4} = K \quad (\Gamma_I - \Gamma_2) \qquad (3,I).$$

$E_{S4} = o$ lorsque $\rho_I = \rho_2$ et $\varphi_I = \varphi_2$.

Pour réaliser une mesure d'admittance, ou de coefficient de réflexion, il suffit de disposer d'un élément de référence, admittance étalon y_e par exemple dont le coefficient de réflexion ($\rho_e e^{j\varphi_e} = \Gamma_e$) plan C C est variable en module et en phase.

Ainsi, pour dtérminer le coefficient de reflexion Γ_x, présenté par une cellule remplie d'un dielectrique (plan b b), on relie la cellule et l'élément de référence aux bras latéraux I et 2 et on annule le signal détecté, par une variation de Γ_e. Une lecture de Γ_e à l'équilibre indique les valeurs du module ρ_x et de la phase φ_x de Γ_x .

b) Détermination de la permittivité.

Nous avons, aux chapitres I et II, mis en évidence l'intérêt de

choisir les hauteurs de cellule multiples de $\frac{\lambda'g}{4}$ ($\lambda'g$ longueur d'onde dans le diélectrique). La détermination de ε' et ε'' dans ces conditions est plus précise et peut, en outre, se faire très rapidement sans abaque puisque la mesure du coefficient de réflexion correspondant Γ_x donne presque directement les valeurs des paramètres A et B .

On a alors en effet :

$$h_n = n \frac{\lambda'g}{4} \quad \text{donc B} \quad \text{puisque} \quad B = \frac{\lambda g}{\lambda'g} \qquad (3,2)$$

et :

$$\frac{I - \rho n}{I + \rho n} = \frac{I}{Sn} = B \operatorname{th} n \frac{\pi}{2} \frac{A}{B} \qquad (3,3)$$

on obtient donc A. Le calcul de ε' et ε'' se fait ensuite facilement.

Pour déterminer les hauteurs h_n, il faut préalablement bien définir la valeur de l'admittance étalon - branche I- pour que l'équilibre soit obtenu lorsque la phase φ_x (plan b b) soit nulle dans la branche 2. Opérant ensuite à phase constante, on recherche les hauteurs h_n de cellule pour lesquelles le signal s'annule : ce sont les hauteurs multiples de $\frac{\lambda' g}{4}$, si le diélectrique est à pertes faibles. On mesure alors le T.O.S correspondant S_n présenté par la cellule.

Lorsque le diélectrique a des pertes, les hauteurs h_n de cellule réalisant l'équilibre ne sont plus exactement multiples de $\frac{\lambda'g}{4}$. Les équations précédentes, encore utilisées, introduisent des approximations dans le calcul de A et de B. Il est nécessaire, pour calculer ces approximations, de connaître les hau-

teurs de cellule pour lesquelles la phase φ_x de Γ_x est nulle.

o) Relations rigoureuses permettant d'obtenir la permittivité d'un diélectrique avec pertes.

On a $\varphi_x = o$ si la suceptance d'entrée de la cellule (bx) est nulle.

Or :

$$b_x = \frac{A \text{ sh } 2A\beta h + B \sin 2B\beta h}{\text{ch } 2A\beta h - \cos 2B\beta h}$$

expression nulle si : $\sin 2B\beta h = -\frac{A}{B} \text{ sh } 2A\beta h$ Les solutions de cette équation donnent les hauteurs de cellule h_n. pour les très faibles pertes, $tg\,\delta < 5.10^{-3}$ (cas qui nous intéresse), nous obtenons :

$$h_n = \frac{n\lambda'g}{4}\left[1 + \frac{\Delta^2}{1-\Delta^2}\right] \qquad (3,4)$$

expression de la forme $h_n = n\frac{\lambda'g}{4}(1+\eta)$ avec $\eta = \frac{\Delta^2}{1-\Delta^2}$ et $\frac{tg\delta}{2}$

D'autre part nous obtenons pour ces hauteurs de cellules correspondantes :

$$B \text{ th } A\beta h_n = \frac{1}{S_n}\left(1 + \frac{\Delta^2}{1+\Delta^2}\right) \qquad (3,5)$$ -conductance d'entrée $g_x < 1$)

Les pertes étant faibles, le terme correctif η introduit est très faible, de l'ordre de 10^{-6}. Il donne toutefois, proportionnellement des corrections plus importantes que celles considérées au mesureur ; et ceci est surtout sensible lorsque les pertes du dielectrique étudié augmentent.

d) Erreur introduite sur la détermination de ε' et de ε''.

Ainsi l'erreur commise lors de la détermination de ε' à partir d'une mesure des paramètres A et B a pour valeur :

$$\frac{\Delta \varepsilon'}{\varepsilon' \text{ réel}} \leqslant \frac{tg^2 \delta}{2}$$

Elle est très faible : la tg δ étant de quelque 10^{-3} l'erreur - par défaut - est donc inférieure à 10^{-6} pour les corps mesurés.

Pour ε'' l'erreur est du même ordre que celle obtenue avec le mesureur ; elle est également très faible (tg δ très faible).

e) Conclusion.

Il est possible de déterminer rapidement et avec précision la permittivité complexe d'un dielectrique à partir d'un pont et d'une cellule de hauteur variable, suivant le principe de mesure déjà utilisé avec le mesureur. Les avantages du pont sont de permettre une mesure à phase constante, et de permettre de calculer facilement les approximations.

Pour les mesures données au chapitre IV les corrections sont tout à fait négligeables (diélectriques d'angle de pertes $< 5.10^{-3}$).

II. Description des éléments du montage que nous avons réalisés.

La fig. (III_2) est relative à ce montage.

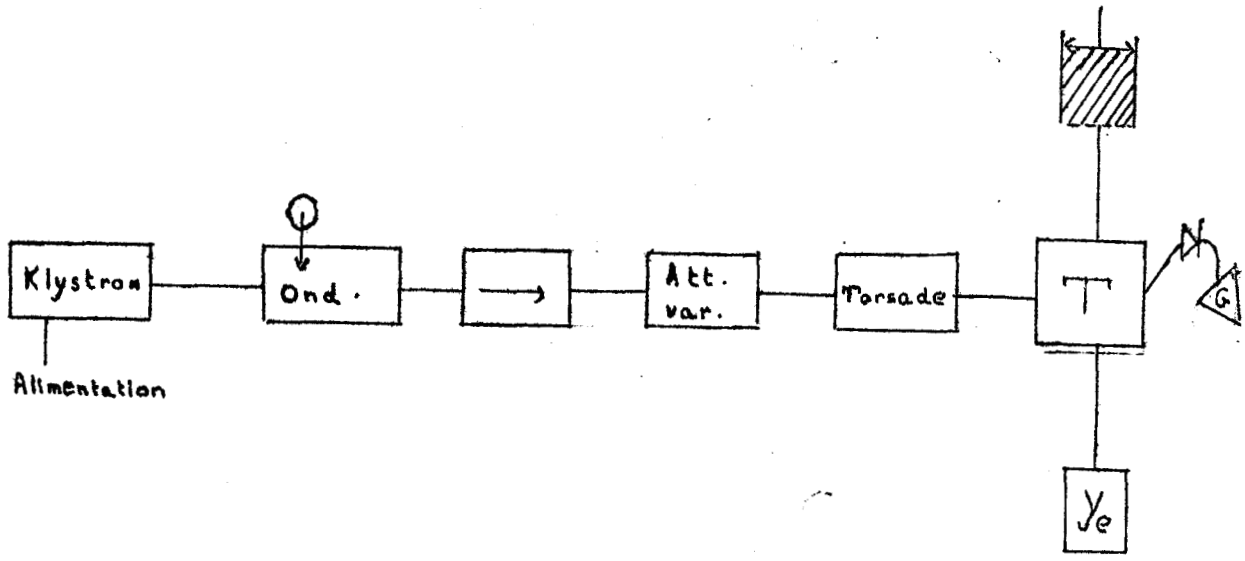


figure III_2

On retrouve les éléments du montage utilisé avec le mesureur pour assurer le découplage en tre la cellule de mesure et la source.

Le T hybride Philipe utilisé a un découplage de 35 DB.

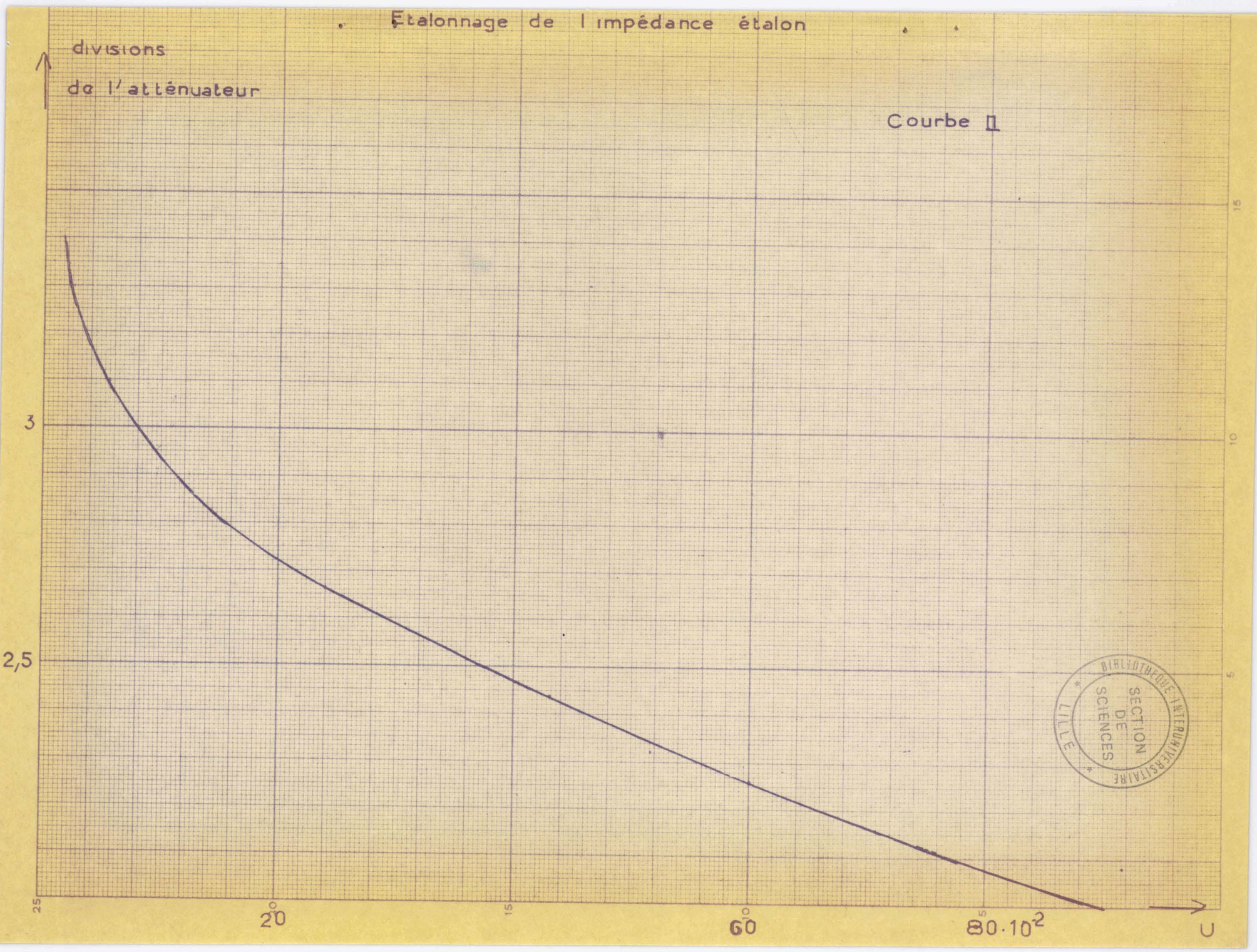
Une torsade est placée immédiatement devant le pont : pour des raisons de commodité les deux branches latérales sont ainsi mises dans un plan vertical. on a disposé en outre dans ces deux branches une impédance étalon et une cellule de mesure.

a) Impédance Etalon.

Elle est contituée par l'assemblage d'un atténuateur L T T suivi d'un piston court-circuit mobile. L'ensemble présente un coefficient de réflexion Γ_e (plan e e) dont,en première approximation le module varie avec l'enfoncement de la lame de l'atténuateur - Repéré par une tête micrométrique au $\frac{I\ mm}{I00}$ -, et dont la phase est commandée par la position du piston court-circuit. Ses valeurs sont déterminées par un étalonnage préalable.

Etalonnage de l'impédance étalon. L'impédance étalon est toujours utiliséà phase fixe (dans le plan e e), au cours d'une mesure de permittivité : il suffit donc de l'étalonner en mesure de T.O.S seulement. La phase de l'impédance est pour cela réglée initialement à la valeur fixe φ_{eo} (déterminée dans le mode opératoire). L'étalonnage se fait ensuite facilement avec une ligne de mesure de T.O.S : Courbe III (le paramètre u a été porté en abcisse, avec $S = \coth u$; ce paramètre rend les calculs sur ξ^* plus simple).

L'atténuateur L T T utilisé comme élément de l'impédance introduit cependant, avec l'atténuation,un déphasage supplémentaire. On a porté sur



BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE
SECTION DE SCIENCES
LILLE

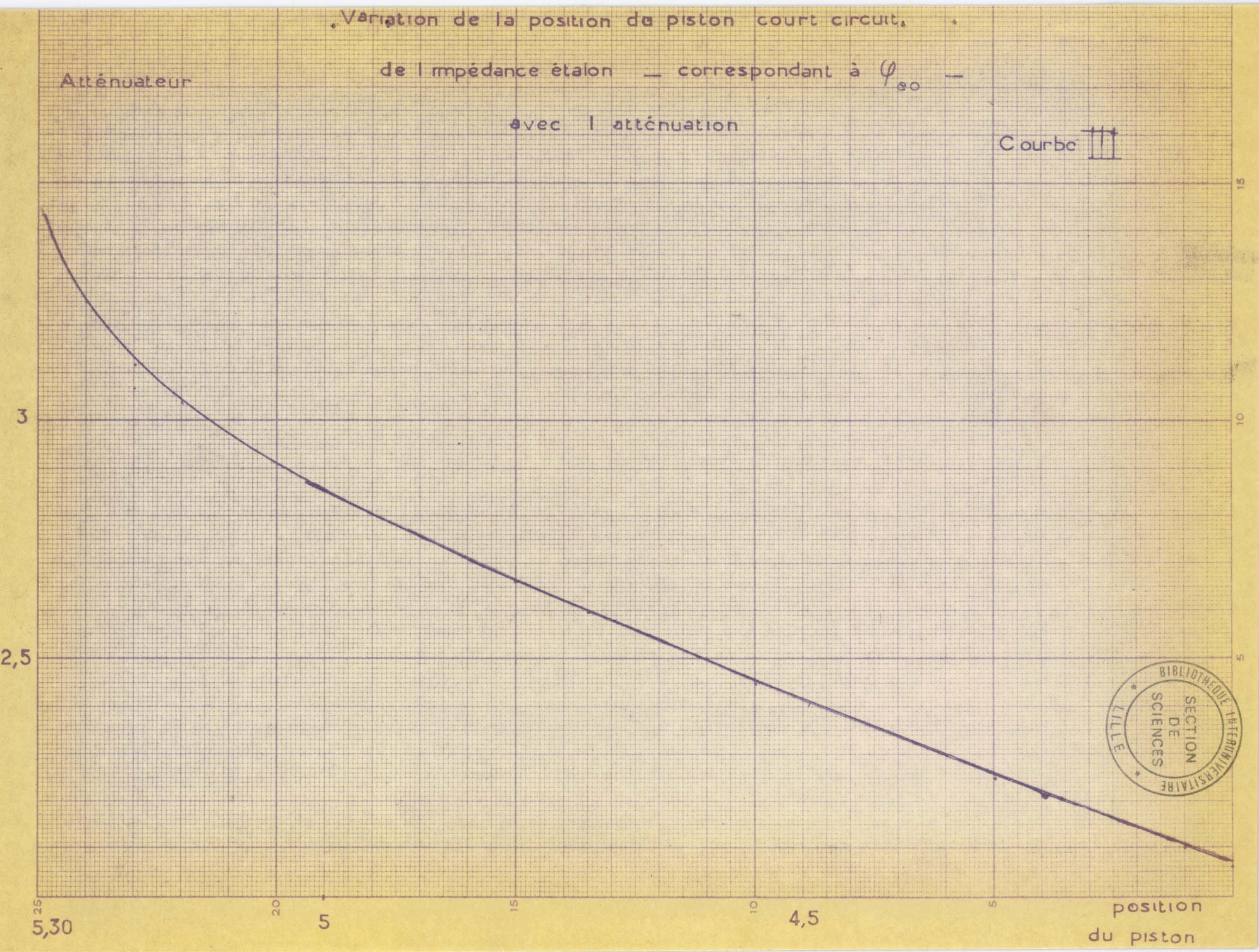
Variation de la position du piston court circuit,

de l'impédance étalon — correspondant à φ_{eo} —

avec l'atténuation

Atténuateur

Courbe III



BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE
SECTION DE SCIENCES
LILLE

la courbe III la variation de φ_{eo} - variation de la position b = o - pour diverses atténuations ; et il est utile de tenir compte de cette courbe pour faire un étalonnage rigoureux.

b) Cellule de mesure.

Nous utilisons une cellule d'une longueur totale de 220 mm. La course du piston court-circuit terminal est très faible par rapport aux dimensions de la cellule.

III . Mode Operatoire.

Il faut, préalablement à toute mesure, déterminer la phase de l'impédance étalon φ_{oo} qui donne l'équilibre pour $\varphi_x = o$. Cela se fait très rapidement à partir de la cellule vide réglée à une hauteur $\frac{\lambda_g}{4}$: la valeur de φ_{oo} est obtenue à l'équilibre. En pratique, on tient compte également de la présence d'un mica placé à l'entrée de la cellule pour en assurer l'étanchéité.

On recherche ensuite, cellule remplie, et pour cette valeur de φ_{eo} une hauteur de cellule h_n permettant d'obtenir de nouveau l'équilibre. On mesure le T.O.S correspondant S_n. Ces informations donnent A et B - (3,2) et 3,3) - et permettent la détermination de ε' et ε''

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= B^2 \ (I - d) + d \\ \varepsilon'' &= 2AB(I - d) \end{aligned} \qquad (3,6)$$

. Pour l'étude de solutions très diluées, on détermine de préférence $\Delta \varepsilon'$ et $\Delta \varepsilon''$, différence entre la permittivité de la solution et celle du solvant. Ces permittivités sont très voisines et pour avoir une précision supérieure sur les quantités $\Delta \varepsilon'$ et $\Delta \varepsilon''$, il est indiqué de mesurer, directement, les différences $\Delta h = h_s - h$, c'est-à-dire le déplacement donné au piston court-circuit de la cellule pour retrouver l'équilibre entre une mesure avec le solvant (h_s) et une mesure avec la solution (h). Les pertes correspondantes relevées sont u_s et u_v.

Si $tg\ \delta < 5.10^{-3}$, en explicitant l'équation (3,6) :

$$\Delta \varepsilon' = - \frac{2 (\varepsilon'_s - d)}{h_s} \qquad (3,7)$$

ε'_s permittivité du solvant.

et, avec une approximation supérieure à $0,2\%$:

$$\Delta \varepsilon'' = \frac{\lambda g}{\pi h_s} \left[B \operatorname{arg\,th} \frac{\operatorname{th} u}{B} - B_s \operatorname{arg\,th} \frac{\operatorname{th} u_s}{B_s} \right] \qquad (3,8)$$

$\Delta \varepsilon'$ et $\Delta \varepsilon''$ ont toujours des valeurs très faibles, si la solution est très diluée et une analyse des causes d'erreur introduites par le montage, s'impose pour connaître la sensibilité et la précision qu'il est possible d'obtenir sur ces quantités.

IV . Causes d'erreur.

a) Variation de fréquence du klystron.

Nous avons donné aux deux bras latéraux une longueur électrique sensiblement équivalente ; et un éventuel glissement de fréquence ne modifie que très légèrement l'équilibre. Ceci nous permet d'utiliser sans inconvénient une cellule de dimension importante.

Pour régler la longueur du bras 2 - branche étalon-, nous avons considéré que le diélectrique placé dans la cellule a une permittivité moyenne $\varepsilon'_g \# 3$ (Benzène) ; la longueur l_2 du bras 2 doit être $l_2 = h_o \sqrt{\varepsilon'_g}$ (h_o longueur totale de la cellule). Les longueurs électriques des 2 bras, alors égales pour $\varepsilon'_g = 3$ sont très peu différentes pour un ε'_g voisin. L'erreur introduite par une variation de fréquence reste ainsi toujours négligeable.

b) Pertes à vide.

Les longueurs géométriques des 2 bras latéraux sont voisines ; ceci permet de compenser en grande partie les pertes à vide de la cellule ; et les pertes à vide dont il faut tenir compte en définitive sont très faibles.

La cellule étant d'autre part très importante, on obtient, même pour les corps à très faibles pertes - solvants non polaires - un T O S assez faible pour pouvoir être mesuré avec précision. Les pertes correspondantes ne sont plus du tout du même ordre de grandeur que les pertes à vide : la différence $u_l - u_v$ est élevée. Aussi est-il possible d'obtenir avec une précision suffisante les pertes des principaux solvants non polaires, ce que n'avait pas permis l'utilisation d'un mesureur de T O S.

Par exemple, un facteur 4 est gagné en précision sur la détermination de la permittivité ε'' du Benzène.

c) Erreur due à l'impédance étalon.

Dans la partie de la courbe d'étalonnage correspondant à $s < 3$, la précision permise sur une mesure de T.O.S (c'est à dire de u : $s = \coth u$). est suffisante. C'est la précision obtenue avec le mesureur = elle est de l'ordre du $^{o}/_{o}$.

D'autre part, l'erreur sur la détermination de l'argument φ_e de Γ_e est du même ordre que celle obtenue habituellement avec le mesureur sur une mesure de phase. Ainsi $\Delta \varphi_e$ correspond à une erreur $\Delta y = \frac{I \text{ mm}}{100}$ faite sur la position d'un minimum : $\Delta \varphi_e = \frac{4 \pi \Delta y}{\lambda_g}$.

d) Dissymétrie du T

Un léger couplage existe entre les bras 3 et 4 du T hybride. L'équation (3,I) est légèrement modifiée. on a :

$$E_{s4} = K (\Gamma_I - \Gamma_2) + s_{34} e^{j \varphi_s} \qquad (3,9)$$

($S_{34} e^{j \varphi s}$) étant un terme qui traduit l'existence du couplage et caractérise le T hybride utilisé.

A l'équilibre, lorsque $E_{s_4} = o$, Γ_1 n'est plus rigoureusement égal à Γ_2 . Le réglage initial effectué sur l'impédance étalon n'est plus rigoureux : la phase φ_x n'est plus nulle ; elle a pour valeur :

$$\Delta\varphi = \frac{s_{34}}{K} \text{ Sin } (\varphi_s - \varphi) \qquad (3,10) \qquad (I)$$

φ est une constante fixée par la position du plan b b '.

Avec le diélectrique, φ_x prend une valeur φ_{x_o} à l'équilibre, et l'erreur commise sur ladétermination de phase est :

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_{x\,o} = \frac{S_{34}}{K} \sin (\varphi_s - \varphi) \left[I - \frac{I}{\rho_x} \right] \qquad (3,10)$$

et lorsqu'on détermine la permittivité complexe d'une solution en faisant initialement une mesure avec le solvant (ρ_{xS}) :

$$\varphi = \frac{S_{34}}{K} \sin (\varphi_s - \varphi) \left[\frac{I}{\rho_x} - \frac{I}{\rho_{x_s}} \right] \qquad (3,11)$$

Sur le module du coefficient de réflexion l'erreur relative commise est donnée par une expression en cos $(\varphi_s - \varphi)$. Il est possible de choisir une distance convenable entre le plan b b' et le plan des jonctions du T pour que cette erreur sur ρ_x soit faible.

Sur la phase φ_x l'erreur est alors maximum ; en pratique cependant, elle reste faible et peut être négligée tout au moins lorsque nous étudions des solutions très diluées, où ρ_x est voisin de $\rho_{x\,s}$.

Détermination de $\frac{S_{34}}{K}$ et de $\varphi_s - \varphi$.

Les paramètres d'erreur qu'introduit la dissymétrie du T se mesurent en disposant deux pistons court-circuit identiques dans les 2 bras latéraux du T, et en relevant, pour un déplacement y_1 du piston, le déplacement correspondant y_2 permettant de retrouver l'équilibre : (fig. II_3).

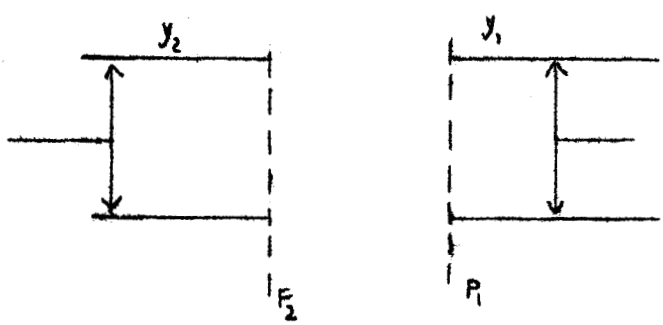
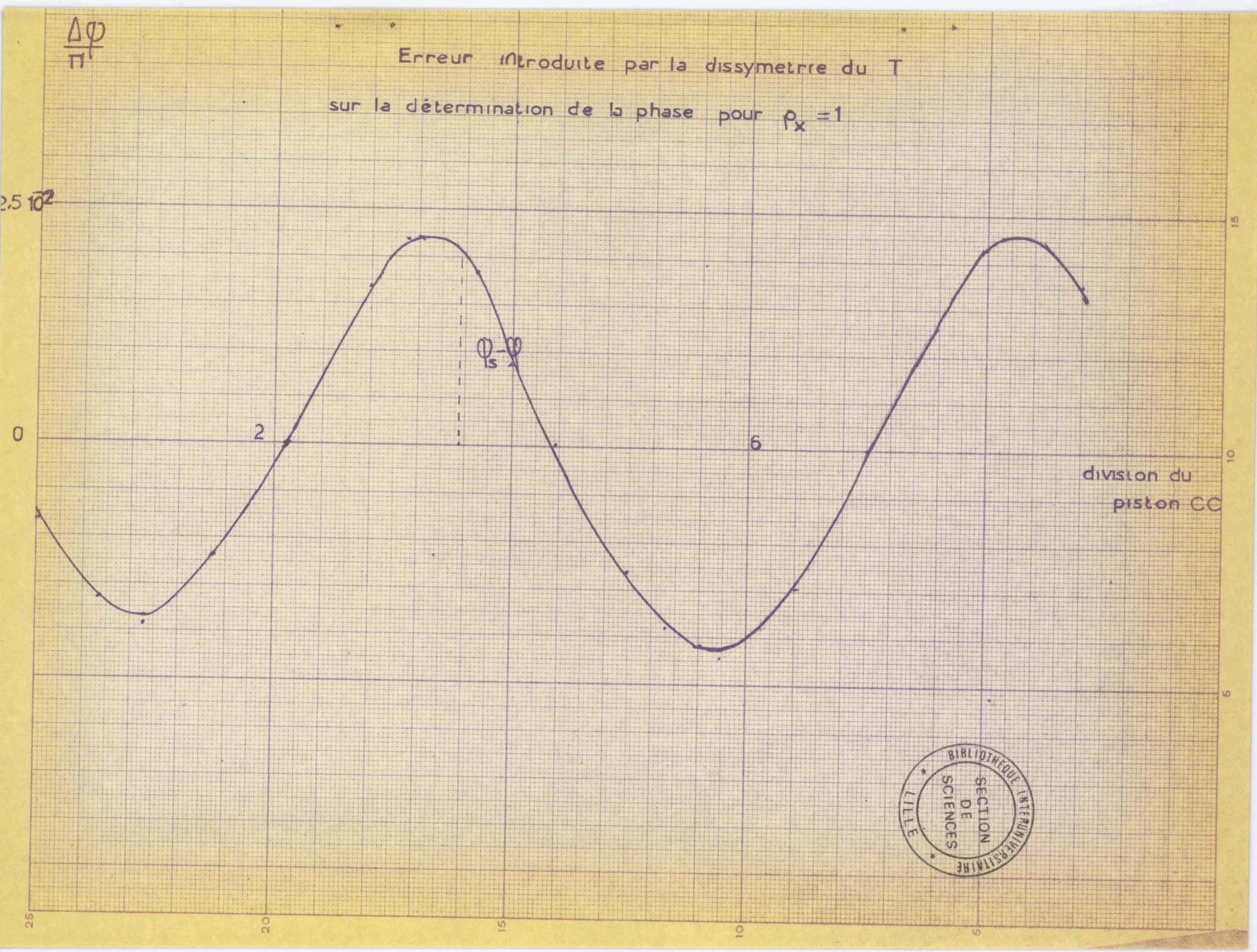
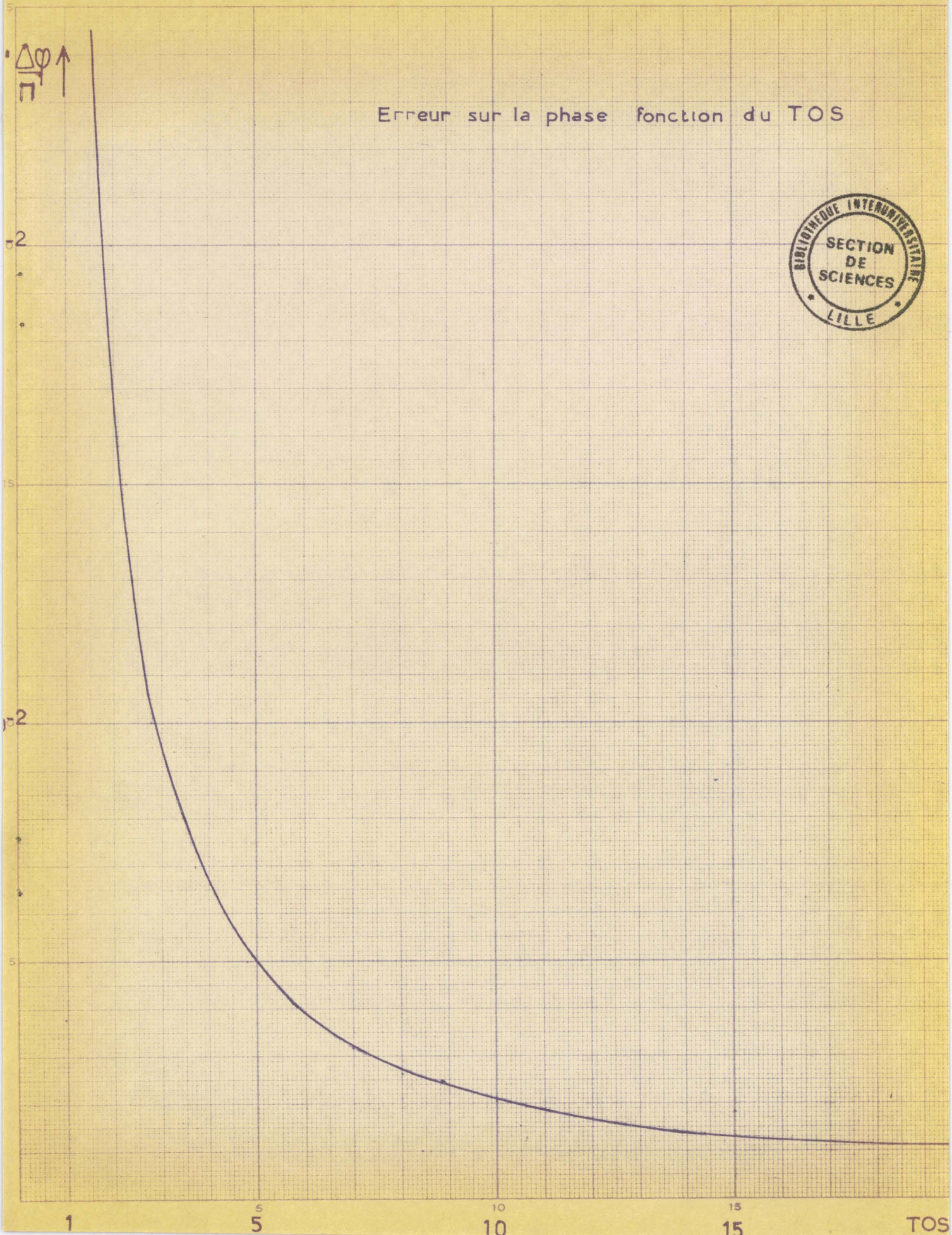


fig. II_3



BIBLIOTHÈQUE INTERUNIVERSITAIRE
SECTION DE SCIENCES
LILLE

Erreur sur la phase fonction du TOS



BIBLIOTHEQUE INTERUNIVERSITAIRE
SECTION DE SCIENCES
LILLE

On a tracé la courbe correspondante : $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_I = 4\pi \frac{y_2 - y_I}{\lambda_g}$

en fonction de $\varphi_s - \varphi_I = \frac{4\pi y_I}{\lambda g}$. L'amplitude moyenne de cette courbe permet d'obtenir $\frac{S_{34}}{K}$:

$$\frac{S_{34}}{K} = 0{,}065$$

Un équilibre avec l'impédance étalon dont la phase est réglée à $\varphi_{e\,o}$ et le piston court-circuit I permet de déterminer à l'aide de la courbe IV la valeur particulière $\varphi_S - \varphi$.

On a :

$$\varphi_s - \varphi \# \frac{\pi}{3}$$

V. Sensibilité du pont en mesure de ε' et de ε''

a) Sensibilité du pont pour ε'

La sensbilité du pont est très grande : les hauteurs de cellules donnant l'équilibre sont en général déterminées à $\frac{I}{I00}$ mm ; ceci correspond - équation (3,7) - à une sensibilité sur ε' de l'ordre de $I0^{-5}$. Elle dépend pratiquement de la précision de lecture des hauteurs h de cellule.

Cette sensibilité est conservée lorsque le T.O.S présenté par la cellule est voisin de I, l'équilibre - à la différence du mesureur- se faisant ici autour d'un zéro avec toute l'énergie

Elle diminue lorsque $g_x > I$, c'est-à-dire si tg $\delta > 5.10^{-3}$

b) Sensibilité du pont pour ε''

En tenant compte de la formule (3,8) et de la courbe d'étalonnage de l'impédance étalon, il est possible de déterminer les variations minimum décelable $\Delta \varepsilon''$. Celle-ci est de l'ordre de 10^{-4}. En réalité ici aussi, c'est la précision de lecture de l'atténuateur qui nous limite.

- Pour les T.O.S voisins de I cependant la sensibilité diminue : (tg $\delta > 5.10^{-3}$).

VI. Stabilisation en température.

Pour profiter pleinement de la sensibilité du pont, il faut évidemment que la température du dielectrique, au cours de la mesure, soit définie avec une précision suffisante. le problème était plus simple dans le cas du mesureur, où un simple chauffage par circulation d'eau dans un serpentin entourant la cellule était suffisant.

Dans le cas qui nous occupe,il s'agit d'obtenir une précision sur ε' de l'ordre de 10^{-5} ; celle-ci ne peut être atteinte pour les solvants utilisés (Benzène,Hexane) que pour une stabilisation de la température de l'ordre de $\frac{1}{10}$ ième de degré.

Dans ce but, le T hybride et les deux branches latérales sont placées dans une enceinte thermostatée ; la tête micrométrique de la cellule et l'impédance étalon,seules,sont accessibles hors de l'enceinte. (une porte a été pratiquée pour enlever ou introduire la cellule). Une première thermostatisation est assurée dans l'enceinte par une résistance chauffante placée le long des parois (un thermomètre à contact permet de stabiliser la température au $\frac{1}{2}$ °). La cellule elle-même est entourée d'un serpentin dans lequel se fait une circulation d'eau de température régulée.

Cette double régulation s'est relevée satisfaisante ; et si la mesure est effectuée lorsque l'équilibre thermique est atteint (environ 15 minutes), il semble qu'aucune erreur ne soit introduite par la température sur la détermination de ε^*

VII. Précision obtenue sur ε' et ε''

a) Pour ε' :

La précision sur ε' est principalement limitée - par une erreur de lecture faite sur h $(0{,}5/100$ mm)

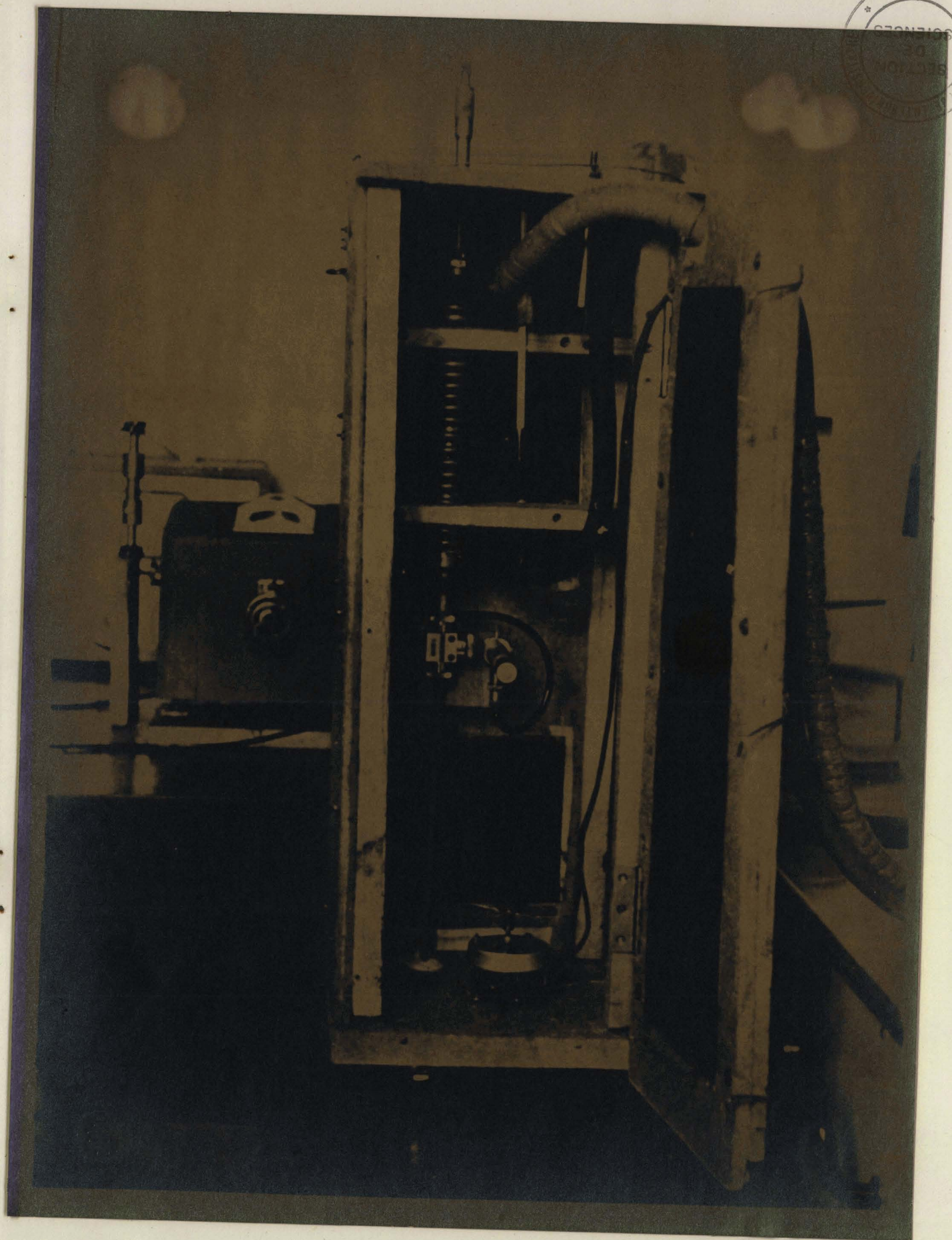
- par la précision du "réglage à b = o" $(\frac{1}{100}$ mm)
- par la dissymétrie du T

L'erreur totale en résultant sur ε' est inférieure de 10^{-4}, Pour $tg\ \delta > 5.10^{-3}$ la précision est plus faible, et atteint $0,5.10^{-3}$.

b) Pour ε''

Celle-ci est limitée par la précision de lecture de l'atténuateur, et par son étalonnage. Des tg δ de l'ordre de quelques 10^{-3} sont déterminées avec une précision de quelques $^{o}/_{o}$.

Pour $tg\ \delta > 5.10^{-3}$, il faut en réalité introduire les corrections indiquées au paragraphe I du chapitre sur le mesureur. $(g_x > I)$.



BIBLIOTHÈQUE SECTION DES SCIENCES LILLE

CHAPITRE IV.

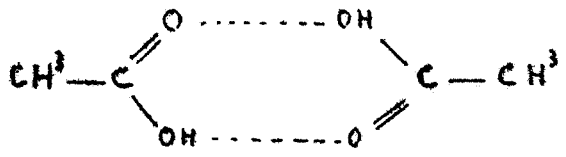
RESULTATS EXPERIMENTAUX.

Dans le cadre de l'étude entreprise par le Laboratoire, sur l'association par liaison H présentée par les acides gras, nous avons déterminé dans la bande des 8 mm, la permittivité complexe de solutions d'acide acétique dans le benzène.

On détermine ξ^* à 25° pour des condentrations en acide Acétique variant de 0,5 à 100 %. Les solutions très diluées (0,5 à 3,5 $^{o}/_{o}$) sont étudiées à l'aide d'un comparateur - T hybride décrit chapitre III. Les solutions plus concentrées sont étudiées à l'aide de la ligne de mesure de T.O.S. Les courbes I et 2 représentent les variations de ξ' et de ξ'' fonction de la concentration ; sur le même graphique ont été portés les résultats obtenus à I MH_z . La courbe 3 représente les variations de la polarisation molaire de l'acide acétique en fonction de la concentration (formule de Debye).

On peut faire les remarques suivantes :

Aux très faibles concentrations, il semble qu'il y ait une augmentation de la polarisation, avec la dilution. Les valeurs obtenues restent cependant faibles (I2 cm^3) ; la polarisation si l'acide était dissocié complètement en molécules libres (monomères) serait de 55 cm^3 : Il semble exister encore à ces concentrations une proportion importante de dimère cyclique non polaire, de formule



Aux fortes concentrations, la polarisation augmente avec la concentration ; il semble que l'on puisse attribuer cette augmentation à la présence au sein du liquide de multimères à chaines ouvertes polaires.

Une interprétation détaillée sera donnée dans une publication présentée au prochain Colloque Ampère en collaboration avec E. Constant.

Permittivité ε^* de Solution Acide Acetique Benzène

à 8 mm, à diverses concentrations.

t = 25°

Mesures faites au Pont (I)

Concentration %		$\Delta\varepsilon'$	$\Delta\varepsilon''$
0,494	I	0,0030	0,00I3
0,704	II	0,00384	0,00I4
0,877	II	0,00405	0,0020
0,99	I	0,0046	0,002I
I,232	II	0,005I4	0,00234
I,75	II	0,0077	
2,07	I	0,008I	0,0033
3,49	I	0,0I43	0,0053
Benzène		ε' = 2,276	ε'' = 0,0026

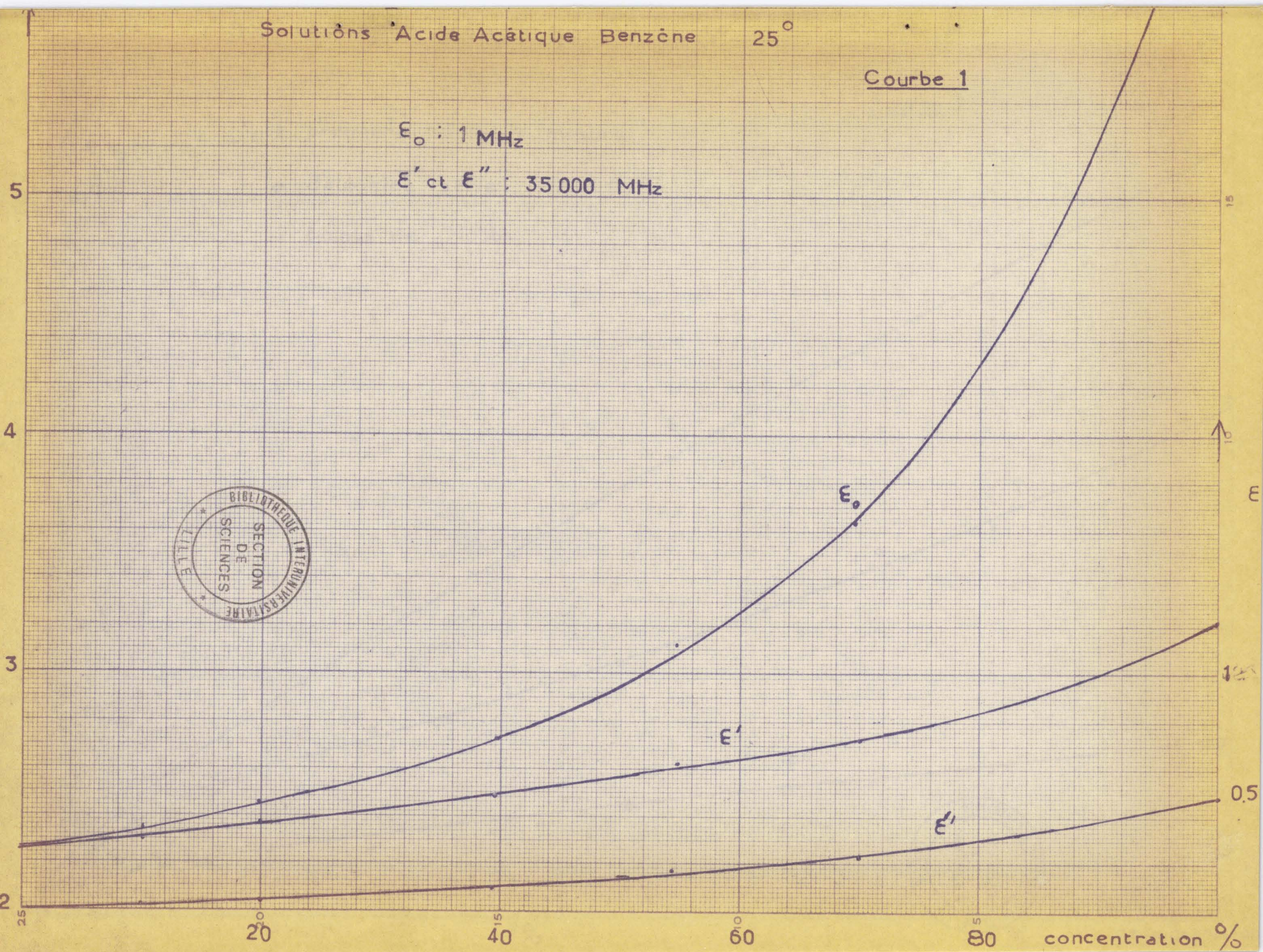
Mesures faites au mesureur

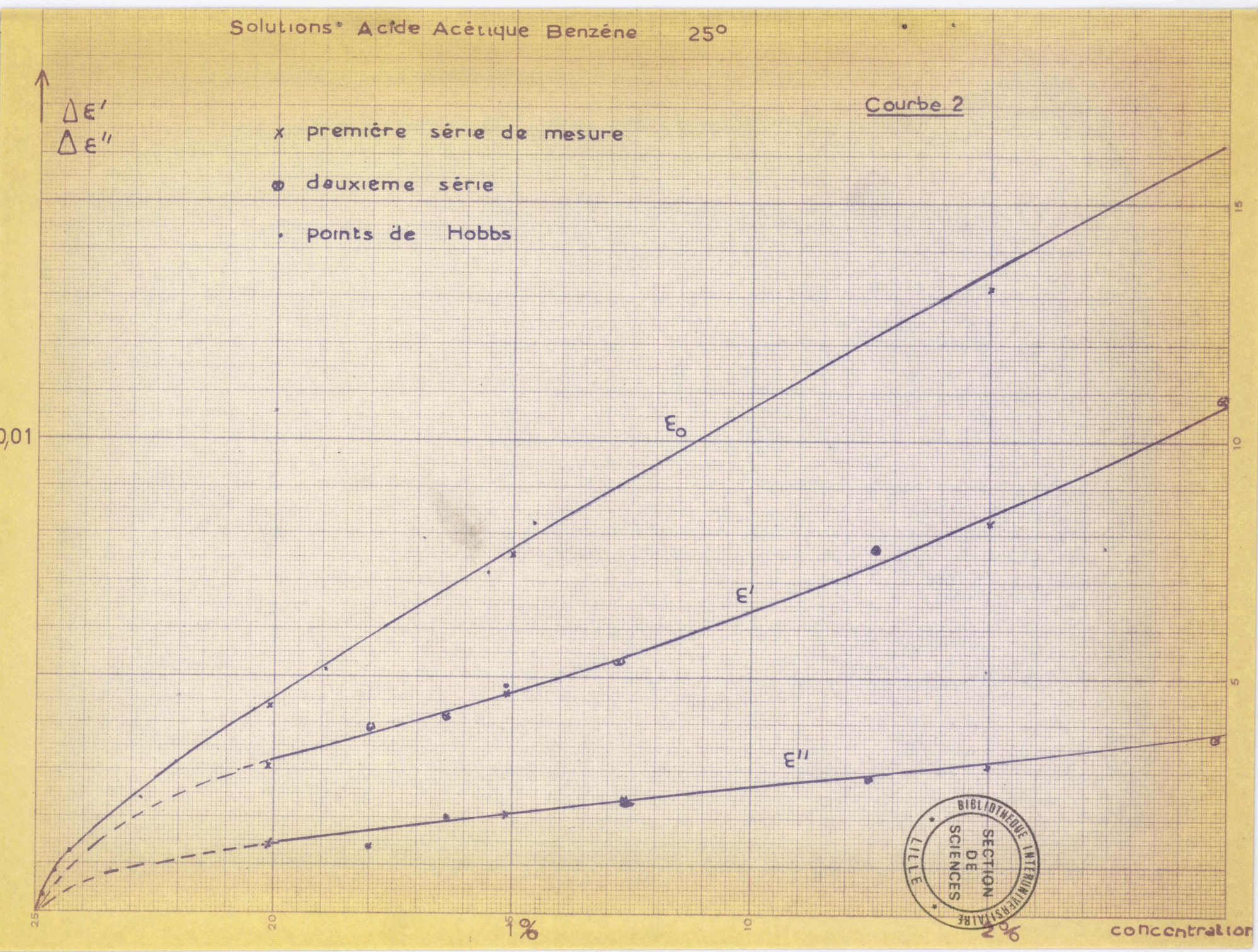
Concentration °/₀	ε'	ε''
2	2,284I	0,0059
4,8	2,294	0,0082
9,7	2,3I6	0,0I62
I6,5	2,34	0,0335
20,25	2,366	0,0452
39,6	2,492	0,II4
54,45	2,624	0,I87
70	2,73I	0,265
I00	3,22	0,48

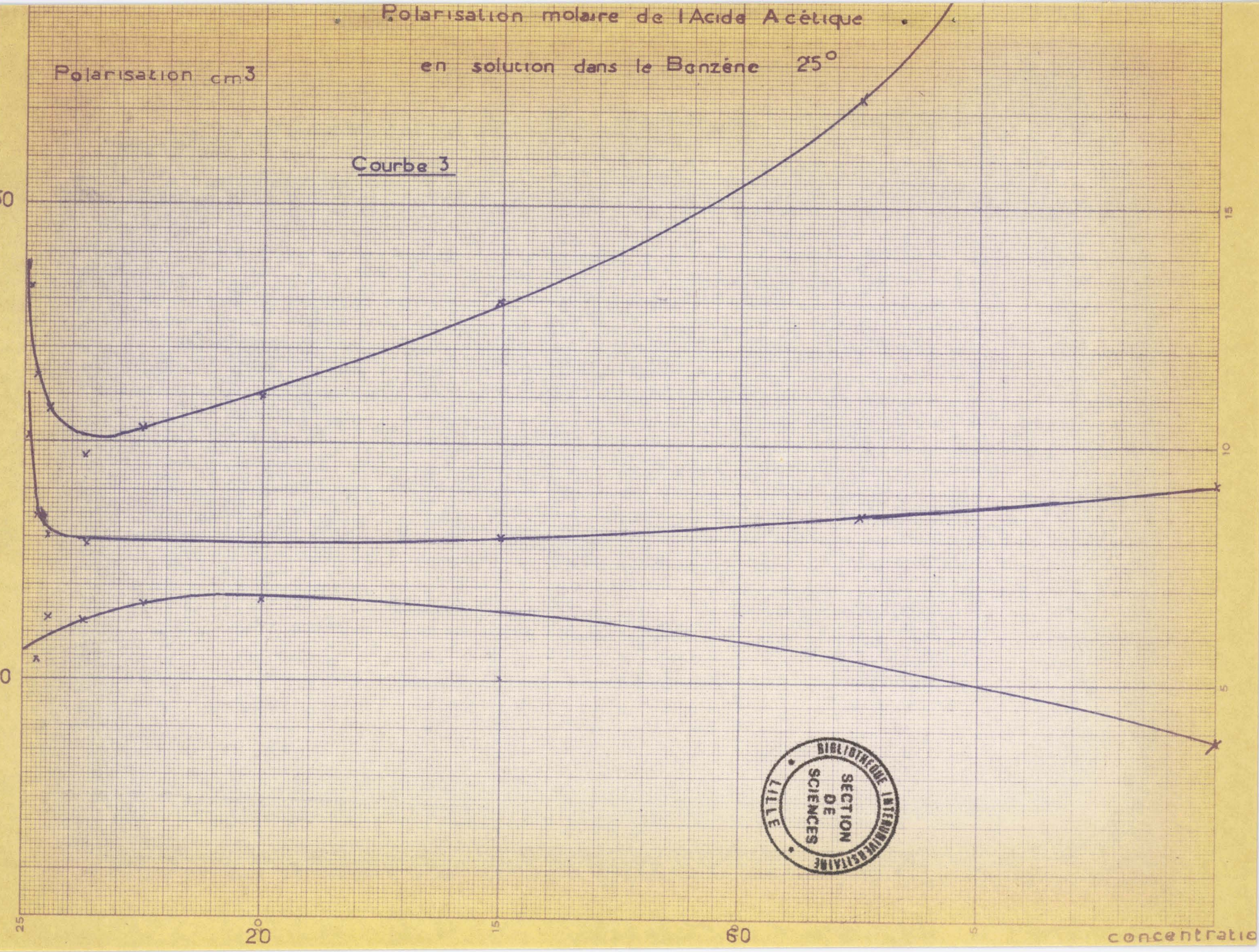
(I) Première série de mesure : I

Deuxième série de mesure : II

BIBLIOTHEQUE INTERUNIVERSITAIRE SECTION DE SCIENCES LILLE


Solutions Acide Acétique Benzène 25°
Courbe 1
ε_0 : 1 MHz
ε' et ε'' : 35 000 MHz
ε_0
ε'
ε''
5
4
3
2
15
10
5
0
1
0.5
ε
20
40
60
80
concentration %
BIBLIOTHÈQUE INTERUNIVERSITAIRE LILLE
SECTION DE SCIENCES


Solutions* Acide Acétique Benzéne 25°
Courbe 2
Δε'
Δε''
x première série de mesure
⊗ deuxieme série
• points de Hobbs
ε0
ε'
ε''
0,01
25
20
15
10
5
1%
2%
concentration
BIBLIOTHEQUE INTERUNIVERSITAIRE
SECTION DE SCIENCES
LILLE



BIBLIOTHÈQUE INTERUNIVERSITAIRE LILLE SECTION DE SCIENCES

C O N C L U S I O N.

La première partie est relative à une étude des propriétés d'une section de guide d'onde de hauteur variable, terminée par un court-circuit (cellule) : nous précisons les valeurs du coefficient de réflexion Γ_x et de l'admittance y_x dans le plan d'entrée de la cellule. Une mesure de Γ_x permet de déterminer la constante de propagation guidée $\gamma'g$ dans le dielectrique, c'est-à-dire ε' et ε''. Cette détermination est beaucoup plus précise et beaucoup plus rapide si la cellule a une hauteur multiple de $\frac{\lambda'g}{4}$ (emploi d'une cellule de hauteur variable).

La deuxième partie est relative au montage ligne de mesure de T.O.S, cellule de hauteur variable. Les hauteurs de cellule $h_n = \frac{n\lambda'g}{4}$ se déterminent automatiquement à partir d'un réglage initial de sonde, réglage définitif pour une fréquence donnée. La connaissance de h_n et du T.O.S correspondant présenté par la cellule permettent d'obtenir facilement ε^*. Si le dielectrique a des pertes, il faut introduire des corrections. En négligeant celles-ci, l'erreur faite sur ε' et ε'' est de l'ordre de $tg^2\,\delta$. La précision obtenue est de 2.10^{-3} sur ε' et environ $2\,^{o}/_{o}$ sur ε'' si $tg\,\delta > 5.10^{-3}$. Nous indiquons les principales causes d'erreur. La méthode présente l'avantage d'éliminer beaucoup d'erreurs systématiques, les mesures se faisant à phase sensiblement constante.

Nous considérons dans une troisième partie l'association d'une cellule de hauteur variable et d'un pont - T hybride symétrique, montage utilisé pour mesurer la permittivité de dielectriques à très faibles pertes. Un réglage préliminaire de l'impédance étalon utilisée permet de déterminer rapidement les hauteurs $h_n = \frac{n \lambda'g}{4}$. Si le dielectrique a des pertes, les corrections à introduire restent négligeables (tg δ étant inférieures à 5.10^{-3}).

La sensibilité du montage est très importante et nécessite une stabilisation de la température au $\pm/_{10}$ième de degré. La précision obtenue est de 5.10^{-5} sur ε' et de quelques $^{o}/_{o}$ sur ε'' dans la gamme des tg δ considérées. Les causes d'erreur sont moins nombreuses qu'avec la ligne de mesure de T.O.S et on opère ici à phase rigoureusement constante.

Nous donnons dans une 4ième partie le résultat de mesures faites sur des solutions d'Acide Acétique dans le Benzène, pour des concentrations comprises entre $0,5^{o}/_{o}$ et $100^{o}/_{o}$ à la température 25°. Ces mesures ont été faites au pont pour les concentrations inférieures à $3^{o}/_{o}$, et au mesureur pour les concentrations supérieures.

BIBLIOGRAPHIE

(1) E. CONSTANT : Diplome d'Etudes Supérieures 1958

(2) CG MONTGOMERY Technique de mesure en micro-onde (Tome II)

(3) BROMWELL and BEAM Theory and application of microwave

(4) C J F BOTTCHER Théory of Electric polarisation

(5) A. LEBRUN Cours d'Hyperfrequence

(6) Roberts et Von Hippel ; Journal of applied physics p. 610, 1946

S E C O N D S U J E T

Proposition donnée par la Faculté :

D I O D E T U N N E L