Dispositif de mesure locale de l'amplitude et de la direction du champ électrique dans les diélectriques en régime variable

J.C. Filippini, C. Marteau

► To cite this version:

J.C. Filippini, C. Marteau. Dispositif de mesure locale de l'amplitude et de la direction du champ électrique dans les diélectriques en régime variable. *Revue de Physique Appliquée*, 1987, 22 (4), pp.261-269. 10.1051/rphysap:01987002204026100 . jpa-00245539

HAL Id: jpa-00245539

<https://hal.science/jpa-00245539>

Submitted on 1 Jan 1987

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

07.50 — 07.60F — 42.80K — 77.50

Dispositif de mesure locale de l'amplitude et de la direction du champ électrique dans les diélectriques en régime variable

J. C. Filippini et C. Marteau

C.N.R.S. Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques, 166 X, 38042 Grenoble, France

(Reçu le 10 septembre 1986, révisé le 1^{er} décembre, accepté le 12 décembre 1986)

Résumé. — On décrit un nouvel appareil de mesure du champ électrique dans les diélectriques transparents. Son originalité réside dans le fait qu'il mesure à la fois l'amplitude et la direction du champ électrique aussi bien en régime statique qu'en régime variable. La méthode est fondée sur la mesure ponctuelle de la biréfringence induite par effet Kerr dans le diélectrique. La mesure de formes de lumière variant rapidement dans le temps a été rendue possible par l'utilisation, comme modulateur, d'une cellule de Kerr à champ électrique tournant utilisant un liquide nématogène. La résolution de l'appareil qui a été réalisé est de 3×10^{-3} radian en déphasage optique et de 3 degrés en direction à la fréquence de 1 kHz.

Abstract. — A new device for the measurement of the electric field in transparent dielectrics is described. Its originality lies in the fact that it measures both magnitude and direction of the electric field as well in static as in dynamic regime. The method is based on the local measurement of the birefringence induced in the dielectric by the Kerr effect. The modulator of the polarimetric system is a rotating field Kerr cell using a nematogenic liquid, a method which allows for the analysis of fast variations of the birefringence. The resolution of the presented model is 3×10^{-3} radian for the optical phase retardation and 3 degrees for the direction of the electric field, at the frequency of 1 kHz.

1. Introduction.

La connaissance de la distribution des charges d'espace est un élément d'une importance primordiale pour la compréhension des phénomènes de conduction électrique dans les diélectriques. Cette distribution est rarement mesurable de manière directe mais elle est accessible par des mesures de potentiel ou de champ électrique. La connaissance des distributions de charge ou de champ dans les diélectriques est également essentielle pour leurs applications à l'isolation électrique : les charges d'espace pouvant exister à l'intérieur de l'isolant sont susceptibles, en effet, d'induire localement des valeurs de champ électrique voisines de la rigidité diélectrique du matériau. Les risques de claquage qui résulteraient de l'absence de la prise en compte de ces phénomènes lors de la conception du matériel sont d'autant plus grands que l'on tend aujourd'hui, pour des raisons économiques, à augmenter les contraintes auxquelles sont soumis les isolants.

Plusieurs techniques de mesure de charges, de potentiel ou de champ, fondées sur l'utilisation de divers phénomènes physiques, ont été proposées.

Les plus anciennes sont les techniques de mesure

de potentiel par sondes métalliques utilisées pour les gaz et les liquides. Leurs inconvénients sont bien connus : perturbations du phénomène étudié dues à la présence de la sonde, possibilité d'utilisation limitée aux grands espaces entre électrodes. La détermination du champ électrique à partir de la biréfringence induite par effet Kerr est utilisée, depuis très longtemps aussi, dans le cas des gaz et surtout dans le cas des liquides [1].

Plus récemment sont apparues de nouvelles techniques, la plupart destinées à des mesures sur des solides pour lesquels les méthodes précédentes sont inapplicables. Certaines sont plutôt adaptées à la détermination de la charge ou du champ électrique dans des isolants solides de faible épaisseur : il s'agit des méthodes utilisant un faisceau d'électrons [2], une onde thermique [3, 4] ou une onde acoustique [5] ; une méthode voisine de cette dernière, mettant à profit les variations de potentiel induites sous l'effet de la pression a également été appliquée pour déterminer le champ électrique dans des solides et des liquides sous forte épaisseur [6].

Les méthodes fondées sur l'effet électrooptique de Kerr restent cependant les plus utilisées. Elles sont applicables à tous les milieux transparents — gaz,

liquides ou solides — mais c'est pour les liquides qu'elles présentent le plus d'intérêt. Du fait que la mesure optique intègre la biréfringence induite par le champ électrique sur tout le trajet de la lumière l'application de ces méthodes est limitée aux géométries de translation qui sont d'ailleurs les plus utilisées. En revanche, le temps de réponse de l'effet Kerr étant très court (généralement $\ll 1 \mu s$), ces méthodes ont l'avantage de permettre l'étude des champs électriques variables dans le temps. Selon la technique utilisée on peut obtenir soit une image globale du champ électrique dans l'espace entre les électrodes, soit une mesure ponctuelle des valeurs de ce champ.

Les premières méthodes d'effet Kerr utilisées donnaient une image globale du champ électrique. La cellule à étudier étant placée entre deux polariseurs, l'intensité lumineuse transmise dépend de la biréfringence de la cellule. Si cette biréfringence n'est pas uniforme — parce que le champ électrique ne l'est pas — des variations d'intensité (en lumière monochromatique) ou des couleurs (en lumière blanche) apparaissent. On obtient ainsi une image qui est une « carte du champ » et on peut en déduire, de diverses façons, la valeur locale de ce dernier. Ces méthodes, qui ont l'avantage d'être très simples, présentent toujours de l'intérêt dans certains domaines [7, 8]. L'utilisation de toutes sortes de compensateurs et en particulier de compensateurs à pouvoir rotatoire [1] permet d'augmenter leur sensibilité et de faire aussi, par cinématographie rapide, des mesures en régime transitoire comme l'étude des variations de champ dues à l'établissement des charges d'espace lors de l'application d'une tension [9, 10].

Plus récemment ont été mises au point des méthodes dans lesquelles le champ électrique est analysé point par point, la sonde étant un faisceau lumineux de petit diamètre, comparé à la distance entre électrodes. Elles permettent d'avoir rapidement, par l'intermédiaire d'un photodétecteur, une mesure locale et instantanée du champ électrique, en utilisant, pour atteindre une bonne sensibilité, les différentes techniques de modulation utilisées en polarimétrie. Divers appareils utilisant des cellules de Pockels [11], des analyseurs tournants [12], des modulateurs photoélastiques [13] ont été réalisés, donnant une mesure locale de l'amplitude du champ électrique, en régime statique ou dynamique.

Dans le présent article, nous décrivons un nouveau dispositif d'analyse locale du champ électrique par sonde optique qui, non seulement donne l'amplitude du champ électrique mais aussi sa direction, aussi bien en régime statique qu'en régime dynamique.

2. Principe de la mesure.

Sous l'action d'un champ électrique une substance isotrope acquiert les propriétés optiques d'un cristal

uniaxe. Si n_0 est l'indice ordinaire correspondant aux vibrations perpendiculaires au champ électrique E et n_e l'indice extraordinaire correspondant aux vibrations parallèles au champ, la biréfringence induite est donnée par

$$n_e - n_0 = B \lambda E^2 \quad (1)$$

λ étant la longueur d'onde de la lumière et B la constante de Kerr de la substance. La direction de l'axe optique est celle du champ électrique.

Les méthodes de polarimétrie disponibles donnent généralement accès au déphasage φ introduit par la cellule entre les composantes d'une onde lumineuse polarisée linéairement ou circulairement, ainsi qu'à l'angle θ définissant l'orientation de l'ellipse de lumière correspondante.

Comme $\varphi = 2 \pi B l E^2$ (1), l étant la longueur d'interaction entre le champ électrique et l'onde lumineuse, la connaissance de φ et de θ suffit pour définir l'amplitude et la direction du champ électrique.

Plusieurs méthodes polarimétriques peuvent être envisagées, utilisant des modulateurs de lumière de natures diverses : modulateurs à effet Kerr, à effet Pockels, à effet photoélastique, analyseur tournant, biréfringent tournant. Le dispositif de mesure de φ et de θ présenté ici utilise comme modulateur un biréfringent tournant à vitesse constante [14, 15]. La lumière incidente, émise par un laser polarisé linéairement traverse successivement un polariseur d'axe ox (Fig. 1), un biréfringent caractérisé par un déphasage Φ tournant à la vitesse Ω , la cellule d'étude (biréfringent caractérisé par les angles φ et θ cherchés) un filtre circulaire constitué par une lame quart d'onde suivie d'un polariseur convenablement orientés, et est recueillie par une photodiode.

Fig. 1. — Schéma du dispositif de mesure.

[Schematic representation of the optical arrangement.]

L'utilisation du formalisme de Poincaré permet de calculer de manière assez simple la valeur de l'intensité lumineuse reçue par le photodétecteur : elle est la somme de trois termes, l'un continu I_c , les deux autres sinusoïdaux de pulsations 2Ω et 4Ω :

$$I_c = \frac{I_0}{2} \left[1 - \frac{\sin \varphi}{2} (1 + \cos \Phi) \sin 2\theta \right] \quad (2)$$

$$I_{2\Omega} = -\frac{I_0}{2} \sin \Phi \cos \varphi \sin 2\Omega t \quad (3)$$

$$I_{4\Omega} = \frac{I_0}{2} \sin \varphi \frac{1 - \cos \Phi}{2} \sin (4\Omega t - 2\theta) \quad (4)$$

La mesure de l'amplitude du signal en $2\ \Omega$ donne la valeur de φ , la mesure de la phase du signal en $4\ \Omega$ donne la valeur de θ .

3. Dispositif de mesure.

L'appareil, dont le schéma général est donné sur la figure 2 se compose de trois parties principales qui vont être décrites ci-dessous : (A) la chaîne optique, (B) l'ensemble électronique, (C) l'acquisition et le traitement informatique.

Fig. 2. — Schéma de principe de l'ensemble de l'appareil.

[Block diagram of the instrument.]

3.1 LA CHAÎNE OPTIQUE. — La partie optique de l'appareil, dont le schéma de principe a été donné sur la figure 1, est réalisée de la façon suivante :

La source de lumière est un laser Hélium-Néon de puissance 5 mW donnant à sa sortie un faisceau de lumière polarisée de longueur d'onde $6328\ \text{\AA}$, de diamètre 0,8 mm. Le laser est suivi d'un prisme polariseur P_1 destiné à augmenter le taux de polarisation de la lumière et d'une lentille convergente de distance focale 200 mm permettant d'avoir dans la cellule d'étude centrée sur son foyer un faisceau de lumière plus fin, de l'ordre de 0,2 mm. La cellule d'étude est précédée par le modulateur de lumière constitué par un biréfringent tournant mettant en œuvre l'effet Kerr des liquides nématogènes : ce modulateur original, élément essentiel de la chaîne optique, sera décrit en détail. La cellule d'étude est suivie d'un analyseur circulaire constitué par deux lames quart d'onde dont les axes sont à 45° l'un par rapport à l'autre suivie d'un polariseur P_2 identique à P_1 . Deux lames quart d'onde ainsi placées sont, en effet, équivalentes à une seule pour certaines formes de lumière [14]. L'utilisation inhabituelle de deux lames quart d'onde au lieu d'une, améliore sensiblement la qualité de l'analyseur circulaire et facilite

beaucoup les réglages. Enfin, la lumière issue de l'analyseur circulaire est recueillie par une photodiode.

3.2 DESCRIPTION DU BIRÉFRINGENT TOURNANT. —

Le moyen le plus simple de réaliser un biréfringent tournant consiste à entraîner par un moteur une lame biréfringente cristalline. Ce procédé présente cependant plusieurs inconvénients : vibrations, bruits, vitesse de rotation limitée, interférences entre faisceau incident et faisceau réfléchi.

Tous ces inconvénients sont éliminés si, dans un milieu isotrope, on induit une biréfringence tournante au moyen d'un champ électrique ou magnétique tournant, ce qui est possible à partir de phénomènes physiques tels que l'effet Kerr, l'effet Pockels ou l'effet Cotton-Mouton. Compte tenu de la nature des matériaux disponibles c'est l'effet Kerr des liquides qui permet le mieux de résoudre ce problème et c'est cette solution que nous avons adoptée.

3.2.1 Cellules de Kerr à champ tournant. — Pour obtenir le biréfringent tournant à vitesse constante qui doit nous servir de modulateur, il suffit de soumettre un liquide convenable à un champ électrique d'intensité constante tournant à vitesse constante. La solution rigoureuse est donnée par une infinité d'électrodes disposées à la périphérie d'un cylindre et alimentées par une source ayant une infinité de phases. Une solution approchée s'obtient par tout dispositif symétrique d'électrodes alimenté par des tensions polyphasées sinusoïdales. En pratique, on utilise un faisceau laser et seule une partie du cylindre située au voisinage de son axe est utile : un petit nombre d'électrodes suffit alors car la distorsion $\Delta E/E$ du champ électrique est faible près du centre : 10^{-4} pour 6 électrodes, 10^{-2} pour 4 électrodes dans le dixième de l'espace entre électrodes [16].

Les premières cellules de Kerr à champ tournant pouvant fonctionner en régime permanent utilisaient du nitrobenzène purifié par électrodialyse. Elles permirent de réaliser des biréfringents tournants aux qualités optiques remarquables, par exemple une cellule à 6 électrodes formant lame biréfringente tournant à 10 kHz, de déphasage Φ ajustable entre 0 et 2π et constant à 10^{-3} près pour un faisceau laser de 1 mm de diamètre [16, 17]. En contrepartie, la mise en œuvre de ces cellules nécessitait des équipements annexes relativement importants : générateurs de hautes tensions alternatives polyphasées de l'ordre de 5 kV, dispositifs de purification ionique du nitrobenzène par électrodialyse avec recyclage permanent du liquide dans la cellule, ce qui constituait un ensemble encore important malgré l'entraînement du liquide au moyen d'une pompe ionique [18]. Le souci de réduire les tensions et puissances de commande ainsi que l'encombrement des appareils nous a conduits à chercher d'autres matériaux que le

nitrobenzène et une solution a été trouvée dans l'utilisation de certains liquides nématogènes [19].

3.2.2 Utilisation des liquides nématogènes. — Dans leur phase isotrope, au voisinage de la température de transition T_c avec la phase nématique certaines constantes physiques de ces liquides ont des variations importantes avec la température et peuvent atteindre des valeurs très élevées. Il en est ainsi de la constante de Kerr qui, dans le cas du 5 CB (4'-n-pentyle-4-cyanobiphényle) à 1°C au-dessus de la température de transition est près de 30 fois celle du nitrobenzène [20]. Les phénomènes prétransitionnels responsables de ces grandes valeurs de la constante de Kerr ont aussi des conséquences moins intéressantes : diminution de la transmission de la lumière, augmentation du temps de réponse de l'effet Kerr quand T s'approche de T_c [21]. Le choix de la température de fonctionnement résultera donc d'un compromis entre l'intérêt d'avoir une grande constante de Kerr (T près de T_c) et celui d'avoir une bonne transmission de la lumière et un court temps d'établissement de l'effet Kerr (T loin de T_c). Pour notre application, la température $T = T_c + 1^\circ\text{C}$ est un bon compromis car la transmission de la lumière dans le rouge et le proche infrarouge est pratiquement la même que celle du nitrobenzène et le temps d'établissement de l'effet Kerr est $0,45\ \mu\text{s}$ ce qui autorise des fréquences de rotation de l'ordre de 100 kHz [22]. Les phénomènes de conduction sont beaucoup moins contraignants que dans le cas du nitrobenzène. Une fois purifié par simple distillation le liquide peut être soumis en permanence à des tensions alternatives jusqu'à des fréquences de plusieurs centaines de kHz. La seule contrainte est due aux grandes variations de la constante de Kerr avec la température qui imposent une stabilisation de cette dernière à mieux que $0,1^\circ\text{C}$ près. En revanche, les avantages obtenus par rapport au nitrobenzène sont importants : tension de commande divisée par 5, puissance divisée par 100 grâce au rapport favorable des permittivités, suppression du système auxiliaire de purification.

3.2.3 Description de la cellule réalisée. — La cellule de Kerr à champ tournant réalisée comporte 4 électrodes constituées par des barreaux cylindriques en acier de diamètre 2 mm et de longueur 5 cm disposés régulièrement à la périphérie d'un cylindre. Elles sont entièrement noyées, par moulage, dans un cylindre d'araldite de 10 mm de diamètre et 5,2 cm de longueur. Dans l'axe de ce cylindre se trouve un évidement cylindrique de 2,5 mm de diamètre destiné à recevoir le liquide. Les électrodes ne sont donc pas au contact du liquide comme dans les autres cellules construites jusqu'ici, mais séparées de lui par une épaisseur de 0,8 mm d'araldite. Cette disposition, possible puisque les tensions sont purement alternatives et de fréquence suffisante, conduit

à augmenter quelque peu l'amplitude des tensions que doit pouvoir délivrer le générateur, mais simplifie beaucoup la construction. Le corps d'araldite de la cellule est placé dans un tube de laiton, prolongé aux deux extrémités par deux pièces de laiton qui servent aussi à maintenir en place les fenêtres de verre de la cellule. Cet ensemble de laiton joue le rôle de conducteur thermique en vue de la stabilisation de la température du liquide (5 CB porté à $T = T_c + 1^\circ\text{C}$, soit 36°C). Grâce à un montage électronique extérieur très simple, et à l'inertie thermique du corps de la cellule, on a obtenu une régulation de la température du liquide à mieux que $0,05^\circ\text{C}$ près. Un isolant thermique entoure l'ensemble qui est fermé par un tube et deux plaques de laiton, formant un cylindre de 5 cm de diamètre et de 11 cm de longueur. La cellule est alimentée par un générateur 50 kHz à circuit accordé délivrant quatre tensions tétraphasées réglables de 0 à 900 V [23].

En l'absence de tension la cellule présente une faible biréfringence ($\Delta\Phi_0 < 2 \times 10^{-3}$ radian) due au verre des fenêtres. Sous tension, dans les conditions d'utilisation de la figure 1 et avec $\varphi = 0$, il existe un signal en $2\ \Omega$ résiduel dû essentiellement aux harmoniques présents dans les tensions d'alimentation. Le rapport des signaux en $2\ \Omega$ et en $4\ \Omega$ croît avec la tension pour atteindre 2,5 % à 900 V.

3.3 L'ENSEMBLE ÉLECTRONIQUE. — Cet ensemble est destiné à réaliser deux fonctions essentielles :

- Appliquer les tensions sinusoïdales à 50 kHz sur chacune des quatre électrodes de la cellule de Kerr.

- Effectuer la démodulation synchrone des trois signaux nécessaire à la caractérisation du champ.

3.3.1 Générateur de signaux et amplificateurs de puissance. — La partie inférieure gauche de la figure 2 montre l'organisation de l'ensemble permettant d'appliquer les quatre tensions quadriphasées aux quatre électrodes de la cellule de Kerr.

En bas à gauche, se trouve le générateur de signaux de synchronisation. On trouve un oscillateur à quartz de fréquence 400 kHz suivi de trois bascules synchrones donnant les signaux carrés S , S_3 , S_4 dont les fréquences sont respectivement 50, 100 et 200 kHz. Le signal carré 50 kHz est ensuite filtré afin de ne garder que le fondamental à 50 kHz. On trouve donc en sortie du générateur de synchronisation les signaux S_0 , S_3 , S_4 conformes à ceux de la figure 3. Il est à remarquer que ces trois signaux ont des phases relatives nulles aux temps 0, T , $2T$, ... nT . Le signal sinusoïdal S_0 , résultat du filtrage de S , est ensuite dirigé vers un circuit déphaseur qui élabore des signaux S_1 et S_2 . La phase de S_2 par rapport à S_1 est de $\pi/2$, les amplitudes peuvent être ajustées afin de compenser une légère

Fig. 3. — Signaux obtenus à la sortie du générateur de synchronisation.

[Signals from the generator of synchronization.]

dispersion de fabrication des amplificateurs A_1 et A_2 , des transformateurs T_1 et T_2 ou une dissymétrie de la cellule de Kerr.

Les amplificateurs A_1 et A_2 sont des amplificateurs du commerce, de bande passante 100 kHz à -3 dB et délivrant 60 W sur $8\ \Omega$ pour une tension d'entrée de 1 V efficace environ. Les transformateurs sont du type à pot de ferrite accordés sur 50 kHz afin de profiter d'un effet de filtrage améliorant la pureté du signal haute tension appliqué à la cellule de Kerr. Ces transformateurs délivrent quatre tensions quadrphasées sinusoïdales de valeur efficace égale à 780 V environ.

3.3.2 Démodulateurs synchrones. — Le signal lumineux recueilli à l'extrémité de la chaîne optique (Fig. 2) est la somme de trois signaux I_c , $I_{2\Omega}$, $I_{4\Omega}$ (cf. Eqs. (2), (3) et (4) données plus haut). Deux de ces signaux permettent d'obtenir assez simplement les informations relatives au champ dans la cellule de mesure.

On s'arrange, par réglage du déphasage le long du chemin optique, pour que $\sin \Phi$ soit égal à 1 dans l'équation (3) qui devient :

$$I_{2\Omega} = -\frac{I_0}{2} \cos \varphi \sin 2\Omega t.$$

De même, l'équation (4) s'écrit :

$$I_{4\Omega} = \frac{I_0}{2} \sin \varphi (\cos 2A \sin 4\Omega t - \sin 2A \cos 4\Omega t).$$

En posant

$$I_{4\Omega} = I_{\sin 4\Omega} + I_{\cos 4\Omega} \quad \text{et} \quad -\frac{I_0}{4} = A$$

on obtient :

$$\begin{aligned} I_{2\Omega} &= 2A \cos \varphi \sin 2\Omega t \\ I_{1,4\Omega} &= -A \sin \varphi \cos 2A \sin 4\Omega t \\ I_{2,4\Omega} &= A \sin \varphi \sin 2A \cos 4\Omega t. \end{aligned}$$

Une démodulation synchrone de chacun de ces trois signaux à partir de signaux de référence ayant une phase et une fréquence convenables permet alors d'obtenir :

$$V_1 = 2A \cos \varphi \tag{5}$$

$$V_2 = A \sin \varphi \cos 2\theta \tag{6}$$

$$V_3 = -A \sin \varphi \sin 2\theta \tag{7}$$

on calcule alors

$$\sin 2\theta = \frac{V_3}{(V_2^2 + V_3^2)^{1/2}} \tag{8}$$

$$\cos 2\theta = \frac{-V_2}{(V_2^2 + V_3^2)^{1/2}} \tag{9}$$

$$\tan \varphi = \frac{2(V_2^2 + V_3^2)^{1/2}}{V_1}. \tag{10}$$

Nous avons donc recours à un ensemble de démodulation dont le schéma fonctionnel est donné sur la figure 4.

La diode de détection, en haut et à gauche de la figure 4, délivre un courant qui, aux bornes de la résistance de mesure de 1 k Ω , génère une tension proportionnelle à l'intensité lumineuse reçue par la diode. L'amplificateur adaptateur d'impédance A_3 suivi de l'atténuateur commutable délivre, à chacune des deux voies 100 kHz et 200 kHz, des signaux d'amplitude convenable, l'atténuateur par 10 autorisant un domaine de mesure plus large. Sur chaque voie, un filtre passe-bande à variable d'état de

Fig. 4. — Schéma de principe de la démodulation synchrone.

[Principle of the demodulation.]

coefficient de surtension $Q = 20$ et centré sur 100 kHz ou 200 kHz selon la voie considérée, effectuée la rejection des signaux indésirables notamment le signal 100 kHz pour la voie 200 kHz et le signal 200 kHz pour la voie 100 kHz. Les deux filtres passe-bande sont suivis par les amplificateurs A_4 et A_5 dont le coefficient d'amplification vaut 10 afin de présenter aux portes analogiques 1, 2, 3 un signal d'amplitude suffisante pour obtenir une démodulation convenable. Ces portes analogiques effectuent la multiplication des signaux 100 kHz et 200 kHz avec les signaux rectangulaires S_3 , S_4 et S_4 retardé de $\pi/2$. S_3 et S_4 sont délivrés par le générateur de signaux de synchronisation (Fig. 2). La phase de S_3 et S_4 est ajustée de manière à compenser les retards dus au transit des signaux le long de la chaîne de mesure.

A la sortie des portes analogiques on trouve trois filtres passe-bas afin d'éliminer les composantes 100 et 200 kHz résultant de la démodulation. On obtient à leurs sorties les tensions V_1 , V_2 , V_3 citées plus haut.

3.4 ACQUISITION ET TRAITEMENT INFORMATIQUE [24]. — Un commutateur trois voies suivi d'un convertisseur analogique-numérique 12-bits installé sur le bus du calculateur PDP 11 03 permet d'échantillonner successivement les trois tensions V_1 , V_2 , V_3 et de mettre les valeurs obtenues en mémoire. La fréquence d'échantillonnage maximale utile est de 8 kHz.

Le rangement en mémoire se fait dans l'ordre V_1 , V_2 , V_3 , V_1 , V_2 , V_3 ... etc. par un sous-programme d'acquisition, écrit en assembleur. Il est à noter que le gain de la voie 200 kHz n'intervient pas dans le calcul de $\sin 2\theta$ ni dans celui de $\cos 2\theta$ puisqu'il correspond à un terme multiplicateur haut et bas dans les équations (8) et (9), par contre il est nécessaire d'introduire un terme correctif dans (10) pour tenir compte du gain de chacune des deux voies. L'équation s'écrit alors :

$$\tan \varphi = \frac{(V_2^2 + V_3^2)^{1/2} \times C}{V_1^2} \quad (11)$$

$C = 1$ si les gains des deux voies sont égaux

$C = 0,1$ si le gain de la voie 100 kHz est 10 fois celui de la voie 200 kHz

$C = 10$ si c'est le contraire.

Le programme d'acquisition et de traitement demande :

— les valeurs des différents paramètres d'acquisition, nombre d'échantillons, fréquences d'échantillonnages etc. ;

— les valeurs des différents paramètres de calcul, la constante C de (11), le paramètre de Kerr : $K : 1/2 \pi BL$ (B étant la constante de Kerr, L la longueur de l'échantillon traversé).

Les échantillons étant rangés dans l'ordre V_1 , V_2 , V_3 , dans le tableau ITAB, dans l'ordre indiqué ci-dessus, la détermination de $\sin(2\theta)$, $\cos(2\theta)$ et $\tan \varphi$ se fait de la manière suivante (cf. Eqs. (8), (9), (11)) :

$$\sin 2\theta = \frac{\text{ITAB}(3J-1)}{[\text{ITAB}^2(3J-1) + \text{ITAB}^2(3J)]^{1/2}}$$

$$\cos 2\theta = \frac{\text{ITAB}(3J)}{[\text{ITAB}^2(3J-1) + \text{ITAB}^2(3J)]^{1/2}}$$

$$\tan \varphi = \frac{2C[\text{ITAB}^2(3J-1) + \text{ITAB}^2(3J)]^{1/2}}{\text{ITAB}(3J-2)}$$

après le calcul de $\sin 2\theta$ et de $\cos 2\theta$, le programme calcule θ par $\arctan 2\theta$, puis $\tan \varphi$. La détermination de φ par $\tan \varphi$ se fait à π près. Pour déterminer complètement φ dans l'intervalle $0, 3\pi/2$ on procède de la manière suivante : si dans l'ensemble des valeurs on a un point tel que $\varphi < \pi/2$ on peut alors, en suivant l'évolution de φ , avoir toutes les valeurs comprises entre le 0 et $3\pi/2$ avec l'exacte détermination. Pour cela en cherchant la valeur la plus élevée des $\text{ITAB}(3J-2)$ on détermine φ le plus proche de 0. La limitation à l'intervalle $0, 3\pi/2$ est nécessaire afin d'éviter l'ambiguïté entre $\varphi = 0$ et $\varphi = 2k\pi$.

Si φ passe par la valeur $(\pi/2 + k\pi)$, il y a alors une variation brutale d' $\arctan(\tan \varphi)$ d'un échantillon à l'autre. Donc si entre deux échantillons successifs, la variation d' $\arctan(\tan \varphi)$ correspondante est supérieure à $\pi/2$ on en conclut que φ est passé par la valeur, $\pi/2 + k\pi$ et dans ce cas, $\varphi = \arctan(\tan \varphi) + \pi$.

On calcule alors E par la relation $E(J) = [B \cdot \varphi(J)]^{1/2}$.

4. Exemples d'utilisation de l'appareil.

Nous donnons ci-dessous deux exemples simples d'utilisation de l'appareil afin d'illustrer ses possibilités :

4.1 AMPLITUDE D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE VARIABLE DANS LE TEMPS. — Le diélectrique est du nitrobenzène placé entre deux électrodes planes et parallèles recouvertes de membranes électrodialytiques servant à maintenir le liquide dans un état de pureté ionique suffisant pour éviter toute dissipation thermique et pour limiter la présence de charges d'espace au voisinage des électrodes. Le liquide est soumis à une tension alternative v de fréquence 200 Hz, d'amplitude 1 200 V crête à crête et à une tension continue V d'amplitude 5 kV destinée à assurer l'épuration ionique. On a mesuré, en fonction du temps, l'amplitude du champ électrique auquel est soumis le liquide en un point situé dans l'axe des électrodes (diamètre du faisceau : 0,2 mm ;

longueur de liquide traversée : 6 cm ; écartement des électrodes : 6 mm). La fréquence d'échantillonnage choisie est de 4 000 Hz, ce qui permet d'avoir 20 points de mesure par période. La figure 5 donne l'évolution du champ dans l'axe des électrodes en fonction du temps.

Fig. 5. — Mesure de l'amplitude du champ électrique entre deux électrodes planes et parallèles en un point éloigné des extrémités et en régime sinusoïdal.

[Measurement of the magnitude of a sinusoidal electric field between two plane and parallel electrodes at a place far from the edges of the electrodes.]

4.2 CARTE DE CHAMP ÉLECTRIQUE EN RÉGIME STATIQUE. — On a utilisé une cellule à nitrobenzène du même type que la précédente mais avec un écartement d'électrodes de 4 cm et on a exploré l'espace situé entre les électrodes où la direction du champ est constante et celui situé près des bords des électrodes où sa direction varie. La figure 6 donne quelques exemples de détermination du champ électrique dans la région du bord des électrodes : la longueur de chaque vecteur est proportionnelle au module du champ, son orientation est celle du champ. L'incertitude sur l'angle définissant l'orientation du champ est inférieure à $\pm 1,5$ degré. La nature des électrodes de la cellule a été choisie pour minimiser les phénomènes d'injection de charge afin de vérifier les possibilités de l'appareil et, dans ce cas, la distribution du champ obtenue dans cette zone du diélectrique est pratiquement celle que l'on pourrait déterminer par une simulation analogique de l'équation de Laplace. L'intérêt de l'appareil est de donner simultanément et automatiquement la direction et l'amplitude du champ en un point donné. Une application importante se trouve dans la possibilité de mettre en évidence les charges d'espace et, éventuellement, leur évolution dans le temps. La

Fig. 6. — Mesure de la direction et de l'amplitude du champ électrique en régime continu au niveau du bord des électrodes.

[Measurement of the direction and amplitude of the electric field in d.c. voltage near the edges of the electrodes.]

résolution spatiale du système permet de mesurer le champ électrique jusqu'à 0,1 ou 0,2 mm des électrodes et, par conséquent, de faire une analyse relativement fine des charges d'espace près des électrodes. Nous avons fait de telles mesures dans la région du diélectrique située au centre de la cellule. Le tableau suivant donne quelques valeurs du champ électrique E entre les deux électrodes dans la partie centrale de la cellule ; d est la distance comprise entre l'électrode positive et le point considéré.

d (cm)	0,2	1,2	2,2	3,2	3,9
E (kV/cm)	12,5	12,2	12,1	12,05	12,1

Le déphasage optique moyen induit par l'action du champ électrique sur le liquide est voisin de $\pi/2$. Dans ces conditions l'appareil a permis de détecter des écarts de l'ordre de 5×10^{-3} . On constate que le champ électrique est légèrement plus élevé au voisinage des électrodes qu'au centre, ce qui révèle la présence d'hétérocharges. Les phénomènes d'injection sont ici négligeables devant les phénomènes liés à la conduction volumique.

La résolution obtenue ici en régime statique pourrait être obtenue aussi en régime dynamique pour des phénomènes de temps caractéristique de l'ordre de la milliseconde avec l'appareil réalisé. L'emploi d'un calculateur plus performant et l'augmentation de la fréquence de rotation du modulateur permettraient de multiplier la résolution temporelle par un facteur 10 à 100.

5. Conclusion.

Nous venons de présenter un nouveau dispositif de mesure du champ électrique dans les milieux diélectriques transparents. C'est, à notre connaissance, le

premier appareil permettant de mesurer à la fois l'amplitude du champ électrique et sa direction, et ceci aussi bien en régime continu que pour des champs électriques variables dans le temps.

La méthode de mesure ponctuelle par sonde optique qui a été choisie est particulièrement bien adaptée à l'étude des phénomènes dynamiques et autorise un traitement informatique simple des résultats. Les mesures peuvent se faire dans tous les systèmes d'électrodes à géométrie de translation et, en particulier lorsque la distance interélectrodes est relativement petite, le faisceau optique pouvant être focalisé et donner la valeur moyenne du champ sur une section d'environ 0,2 mm de diamètre.

Une originalité du système est l'emploi, comme modulateur, d'un biréfringent tournant constitué par une cellule de Kerr à champ tournant. Les inconvénients du nitrobenzène servant habituellement dans les cellules de Kerr sont évités ici par l'utilisation d'un liquide nématogène placé à une température légèrement supérieure à celle de la transition entre les phases nématique et isotrope. La vitesse de rotation élevée du biréfringent ainsi obtenue (50 kHz dans l'appareil décrit, valeur pouvant être portée à

plusieurs centaines de kHz) permet l'analyse de phénomènes très rapidement variables dans le temps.

L'appareil qui a été décrit permet de mesurer des champs électriques dont le temps d'établissement est de l'ordre de la milliseconde. Cette limitation dynamique est liée à la fréquence maximale d'échantillonnage imposée par le calculateur disponible. En ce qui concerne la mesure de la direction du champ électrique, la résolution du système est d'environ 3 degrés. La précision théorique de la mesure du champ en amplitude est de 0,2 %. La précision expérimentale observée, compte tenu des divers bruits est de 0,5 %. La plus petite biréfringence détectable correspond à un déphasage optique de 3×10^{-3} radian. Ces limitations ne sont pas inhérentes à la méthode choisie mais liées au matériel utilisé. Il est possible d'augmenter encore la précision des mesures par l'utilisation de composants de meilleure qualité, en particulier les lames quart d'onde, les verres des fenêtres de la cellule de Kerr et en améliorant la régularité de la rotation du champ tournant de la cellule de Kerr, en particulier au moyen de tensions plus pures.

Bibliographie

- [1] CROITORU, Z., *Space charges in dielectrics*, in *Progress in dielectrics*, vol. 6, ed. J. B. Birks (Heywood) 1965.
- [2] SESSLER, G. M., *J. Appl. Phys.* **43** (1972) 408.
- [3] COLLINS, R. E., *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 4804.
- [4] DE REGGI, A. S. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **40** (1978) 413.
- [5] LAURENCEAU, P., DREYFUS, G. and LEWINER, J., New principle for the determination of the potential distribution, *Dielectrics* **38** (1977) 46-49.
- [6] MIGLIORI, A. and THOMPSON, J. D., A non destructive acoustic electric field probe, *J. Appl. Phys.* **51** (1980) 479-485.
- [7] ZAHN, M., HIKITA, M., WRIGHT, K. A. and COOKE, C. M., Kerr electro-optic field mapping measurements in electron beam irradiated polymethylmetacrylate Proc. 2nd Intern. Conf. on *Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, July 7-10 (Erlangen, Germany) 1986, p. 489-493.
- [8] KELLEY, E. F. and HEBNER, R. H., Electro-optic electric-field measurements near oil-pressboard interface, IEEE Intern. Symp. on Electr. Insul., conf. record (1984) 311-314.
- [9] JEANMAIRE, G., *Rev. Gén. Elec.* **74** (1965) 499.
- [10] ATTEN, P. and GOSSE, J. P., Transient of One-Carrier Injections in Polar Liquids, *J. Chem. Phys.* **51** (1969) 2804-2811.
- [11] POLLARD, A. F., HOUSE, H., Fast response automatic ellipsometer, *Electron. Lett.* **4** (1968) 166-167.
- [12] ROBERT, A., BOURDON, C., ROYER, J., Présentation des photoélasticimètres modernes, *Sci. Techn. Armement* **3** (1978) 221-446.
- [13] TORNE, A. and GAFVERT, U., Measurement of the electric field in transformer oil using Kerr technique with optical and electrical modulation, Inter. conf. on properties and appl. of diel. mat., june 24-29 (xi' an, China), conf. rec. (1985) 61-64.
- [14] ROBERT, A. et ROYER, J., Lames quart d'onde achromatiques et biréfringent tournant, Application à la photoélasticimétrie et à l'ellipsométrie, *J. Optique* **10** (1979) 219-229.
- [15] ROBERT, A., FILIPPINI, J. C., FERRE, Photoélasticimètre dynamique à biréfringent tournant, brevet n° 7704871 du 21 février 1977.
- [16] LACROIX, J. C., Etude et réalisation d'une cellule de Kerr à champ électrique tournant, Thèse de troisième cycle, Grenoble 1970.
- [17] LACROIX, J. C., TOBAZEON, R., Etude d'une cellule de Kerr à champ électrique tournant dans le nitrobenzène désionisé, Compte rendu de contrat DGRST, comité Mécanique (1972).
- [18] FILIPPINI, J. C., LACROIX, J. C., Etude et réalisation d'une cellule de Kerr à champ tournant à 4 électrodes, Compte rendu de contrat DRME/SECT (1974).
- [19] FILIPPINI, J. C., LACROIX, J. C., Cellule de Kerr à champ électrique tournant, *C.R. Hebd. Séan. Acad. Sci.* **280B** (1975) 305.
- [20] FILIPPINI, J. C., POGGI, Y., Nematogenic liquids : a new class of materials for Kerr cells *J. Phys. D. Appl. Phys.* **8** (1975) L 152.

- [21] FILIPPINI, J. C., POGGI, Y., Temperature dependence of the Kerr effect response time of nematogenic liquids, *Phys. Lett.* **65A** (1978) 30.
- [22] FILIPPINI, J. C., Etude de nouveaux liquides pour cellules de Kerr et applications à la modulation et à la déflexion d'un faisceau laser, Compte rendu de contrat D.R.M.E. (1977).
- [23] FILIPPINI, J. C., LAULIER, G., Etude et réalisation de prototypes industriels de modulateurs de lumière à effet Kerr utilisant de nouveaux liquides nématogènes, Compte rendu de contrat D.G.R.S.T., comité Instruments de Mesure (1978).
- [24] CHAUDET, R., ROBERT, Ph., Mesure du champ électrique dans les Diélectriques, Rapport de projet, E.N.S.I.E.G. (Génie Physique) 1980.
-