Interféromètre de Michelson pour mesures diélectriques en ondes millimétriques

A. Gerschel, C. Brot

► To cite this version:

A. Gerschel, C. Brot. Interféromètre de Michelson pour mesures diélectriques en ondes millimétriques. *Revue de Physique Appliquée*, 1966, 1 (2), pp.113-116. 10.1051/rphysap:0196600102011301 . jpa-00242693

HAL Id: jpa-00242693

<https://hal.science/jpa-00242693>

Submitted on 1 Jan 1966

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.

INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON POUR MESURES DIÉLECTRIQUES EN ONDES MILLIMÉTRIQUES

Par A. GERSCHEL et C. BROT,

Laboratoire de Chimie Physique, Faculté des Sciences, Orsay.

Résumé. — On décrit un interféromètre du type Michelson pour la mesure de la permittivité et des pertes diélectriques à la longueur d'onde de 2 mm. La séparatrice est constituée par une lame d'air d'épaisseur réglable, comprise entre deux prismes de téflon dont les faces sont sous incidence brewstérienne. L'échantillon solide ou liquide forme une lame à faces parallèles placée contre le fond d'une cuve métallique, à l'extrémité de l'un des bras de l'interféromètre. La précision obtenue est fonction inverse de l'absorption diélectrique dans l'échantillon ; pour des pertes moyennes l'erreur reste inférieure à 3 % sur ϵ' et 6 % sur ϵ'' .

Dans le cas du chlorure de tertio-butyle congelé à $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ on a trouvé $\epsilon' = 2,7$ et $\epsilon'' = 1,7$.

Abstract. — A Michelson-type interferometer is described suitable for the measurement of dielectric constants and losses at 2 mm wavelength. The beam-dividing device is an air gap of adjustable thickness situated between two teflon prisms, whose faces undergo Brewsterian incidence. The planar sample, in either liquid or solid phase, lies at the bottom of a metallic cell, at the end of one of the arms of the interferometer. The accuracy of measurements varies inversely with the dielectric losses of the material, being less than 3 % for ϵ' and 6 % for ϵ'' , in the case of average losses. The dielectric constant of solid tert.-butyl chloride at $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ is found to be $\epsilon' = 2.7$ and $\epsilon'' = 1.7$.

Pour mesurer la permittivité et les pertes des diélectriques en ondes millimétriques on peut envisager, pour ces ondes, trois types de propagation : en guide ne transmettant que le mode fondamental, en guide d'onde surdimensionné [1], en espace libre [2, 3, 4, 5]. Les inconvénients de principe de ces méthodes sont respectivement les suivants : trop grande atténuation par pertes dans les parois, présence possible de modes supérieurs parasites, diffraction. On a également proposé des montages

mixtes dans lesquels on compare en amplitude et en phase une onde ayant traversé le diélectrique en espace libre avec une onde de référence guidée [6, 7].

Si on adopte la propagation en espace libre la diffraction est d'autant moins gênante que la longueur d'onde est plus petite par rapport au diamètre du faisceau d'onde. Nous présentons ici un montage utilisant cette propagation ; la longueur d'onde adoptée est $\lambda = 2\text{ mm}$, tandis que les faisceaux ont un diamètre voisin de 5 cm. Le montage est conçu

suivant le principe de l'interféromètre de Michelson. Il est représenté sur la figure 1 ⁽¹⁾.

FIG. 1. — Schéma de l'interféromètre.

Le tube émetteur T est un carcinotron C. S. F. Il est modulé en amplitude à 1 000 Hz (alimentation Fontaine). Il débite, à travers un atténuateur variable A_1 vers un cornet C_1 qui, avec une lentille en téflon L_1 , assure le passage des ondes en propagation libre. La séparatrice S sera décrite plus loin. Le faisceau de référence se réfléchit sur un miroir mobile M_D en laiton doré qui peut être animé d'un mouvement uniforme grâce à un chariot et à un petit moteur électrique. Le faisceau expérimental, après s'être réfléchi sur un miroir de déflexion M_D à 45° du plan de figure, atteint la cellule C contenant le diélectrique.

Celle-ci est constituée par une cuve dorée, horizontale et circulaire, qui est usinée à la partie supérieure d'un bloc de laiton qu'on peut plonger dans un cryostat. Le faisceau expérimental retourne par une deuxième réflexion sur M_D à la séparatrice, à la sortie de laquelle il interfère avec le faisceau de référence. L'onde résultante est reprise par un ensemble $L_2 C_2 A_2$ identique à $L_1 C_1 A_1$, puis détectée en D. Après amplification par l'amplificateur sélectif A. S.

⁽¹⁾ Nous remercions la C. S. F. pour le prêt de plusieurs des pièces constituant notre montage.

le courant du cristal D est enregistré sur le galvanomètre enregistreur E.

La séparatrice S est constituée par la lame d'air comprise entre deux prismes de téflon dont les sections droites sont visibles sur la figure 1. L'épaisseur de cette lame d'air est réglable grâce à un chariot micrométrique permettant la translation de l'un des prismes par rapport à l'autre. On est ainsi maître de l'amplitude relative du faisceau transmis et du faisceau réfléchi. Il est aisé de les amener à une amplitude égale en supprimant alternativement le miroir M_M et le miroir M_D , de façon à ne détecter chaque fois qu'une des deux ondes.

La forme des prismes de la séparatrice, représentée sur la figure, est essentielle au fonctionnement correct du montage : les faces d'entrée et de sortie sont sous incidence brewstérienne ; pour la polarisation employée, qui est perpendiculaire au plan de figure, il y a ainsi suppression des réflexions aux interfaces air-téflon, lors de l'entrée ou de la sortie des faisceaux, et ceci quelle que soit la longueur d'onde utilisée (contrairement au cas des couches quart d'onde). De telles réflexions seraient très indésirables : elles donneraient naissance à des résonances pour certaines positions des miroirs. Chacune des deux ondes (par exemple l'onde de référence de L_1 à M_M , puis de M_M à L_2) doit être une onde progressive pure. En effet, quand les bras de l'interféromètre sont équilibrés (amplitude transmise par la séparatrice = amplitude réfléchie = $1/\sqrt{2} \times$ amplitude incidente), le faisceau de référence doit arriver en L_2 avec l'amplitude $1/\sqrt{2} \times 1/\sqrt{2} = 1/2$, et le faisceau expérimental avec l'amplitude

$$1/\sqrt{2} \times \rho \times 1/\sqrt{2} = \rho/2,$$

si ρ est le coefficient de réflexion de la cellule contenant le diélectrique étudié.

Dans une première version de la séparatrice celle-ci, constituée par deux prismes à bases isocèles rectangles, avait ses faces d'entrée et de sortie perpendiculaires au faisceau. Il en résultait des résonances parasites lors du déplacement du miroir M_M : le tracé fourni par l'enregistreur E présentait des arches périodiques mais non sinusoïdales (fig. 2a).

Après construction de la séparatrice représentée (fig. 1), le profil enregistré lors du déplacement de M_M était très sensiblement sinusoïdal (fig. 2b), comme ce doit être le cas pour l'interférence de deux ondes progressives pures avec détection quadratique. Nous avons également éliminé les réflexions sur les faces d'entrée des lentilles en les revêtant d'une « couche anti-reflet » (P_1 et P_2) constituée par une lame sensiblement quart d'onde en bois de peuplier. (Ce bois a une constante diélectrique = 1,5 voisine de la racine carrée de celle du téflon.) Avec ces améliorations et l'interféromètre étant soigneusement aligné, il ne subsistait plus dans chaque bras qu'un coefficient de réflexion parasite inférieur

FIG. 2. — Profils d'interférence enregistrés lors d'une variation linéaire de la phase φ du faisceau de référence, obtenue par translation uniforme du miroir M_M .

a) Il existe des résonances parasites dues à la mauvaise adaptation des interfaces.

b) Après adaptation des faces de la séparatrice et des lentilles (cellule vide).

c) Après adaptation des faces de la séparatrice et des lentilles, cellule contenant un diélectrique absorbant.

à 0,05, attribuable probablement à une adaptation encore imparfaite à la sortie des cornets.

Nous avons étudié les effets de diffraction possibles en déplaçant longitudinalement et transversalement les pièces de l'interféromètre les unes par rapport aux autres. Ces effets étaient faibles grâce à la petitesse de la longueur d'onde employée. De plus les dimensions des faces de la séparatrice (8×8 cm), des miroirs ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) et de la cellule de mesure ($\phi 10 \text{ cm}$), avaient été prévues nettement supérieures au diamètre des faisceaux.

Disposant de deux ondes progressives sans réflexions parasites ni diffraction notable, on effectue une mesure diélectrique en enregistrant le profil d'interférence que produit le déplacement de M_M , successivement avec la cellule vide et la cellule contenant un échantillon sous épaisseur convenable. Si le diélectrique étudié présente des pertes ($|\rho| < 1$) l'interférence n'est totalement destructive pour aucune position de M_M , et on obtient le tracé de la figure 2c.

Les calculs se conduisent exactement comme dans le cas où, à l'aide d'un chariot détecteur d'ondes stationnaires, on mesure l'impédance d'entrée d'une ligne court-circuitée remplie de diélectrique. (Méthode de Von Hippel [8].) En effet, dans ce dernier cas on mesure l'interférence d'une onde progressive servant de référence, qui n'est autre que l'onde incidente, avec l'onde progressive en sens inverse réfléchie par la section diélectrique. En appelant taux d'interférence s dans notre montage le rapport de l'amplitude minimum à l'amplitude maximum de l'onde en D, cette quantité joue le même rôle que le taux d'ondes stationnaires dans la méthode de Von Hippel. Il en est de même pour le glissement l du système d'interférence quand on introduit dans la cellule le diélectrique étudié.

Les quantités s et l permettent donc de calculer ϵ' et ϵ'' de la manière habituelle dans la méthode de Von Hippel [8]. Il est également possible d'employer les méthodes [9], [10] avantageusement applicables aux diélectriques liquides, qui sont basées sur la variation de s lorsqu'on change l'épaisseur de l'échantillon.

C'est en appliquant cette dernière méthode que nous avons d'abord vérifié que notre montage était bien apte à la mesure des constantes diélectriques complexes. Le tableau I donne les résultats obtenus

TABLEAU I

		PRÉSENT TRAVAIL		SMYTH ET coll.
Chlorobenzène	21 °C	$\epsilon' = 2,47$ $\epsilon'' = 0,390$	21 °C	$\epsilon' = 2,46$ $\epsilon'' = 0,413$
Diphényl-éther	64 °C	$\epsilon' = 2,75$ $\epsilon'' = 0,295$	60 °C	$\epsilon' = 2,68$ $\epsilon'' = 0,331$
Benzophénone	64 °C	$\epsilon' = 3,10$ $\epsilon'' = 0,327$	60 °C	$\epsilon' = 3,09$ $\epsilon'' = 0,331$

pour différents liquides absorbants, en comparaison avec les valeurs obtenues antérieurement à la même fréquence par d'autres auteurs [2] qui utilisaient une autre méthode. Pour ces liquides à fortes pertes les écarts expérimentaux sont de l'ordre de 3 % pour ϵ' et de 6 % pour ϵ'' . La précision serait bien supérieure pour des liquides à faibles pertes [7] car on pourrait alors observer, en faisant croître l'épaisseur d'échantillon, un plus grand nombre de maxima de s , ce qui donnerait une meilleure précision relative dans la détermination de la longueur d'onde dans le diélectrique, donc de ϵ' .

Nous avons enfin utilisé notre montage pour mesurer la constante diélectrique et les pertes du chlorure de tertio butyle solide, à -35 °C.

Ce cristal moléculaire est remarquable en ce qu'il présente, entre -53 °C et -20 °C une phase haute température (« cristal plastique ») dans laquelle les mouvements de réorientation moléculaires sont exceptionnellement fréquents. En effet, la constante diélectrique de ce corps conserve jusqu'à $\lambda = 3$ cm une valeur élevée, voisine de la constante diélectrique statique [11].

La mesure que nous avons effectuée avait pour but de localiser en fréquence la zone de relaxation

diélectrique, et par là la fréquence moyenne des sauts orientationnels des molécules. Nous avons employé la méthode des épaisseurs variables, en ajoutant successivement des petites quantités de liquide, connues avec précision, à la surface de l'échantillon congelé. Un chauffage superficiel par lampe infrarouge permettait, par fusion, une égalisation de la couche superficielle ; la recongélation de l'échantillon demandait ensuite quelques secondes vu sa faible épaisseur. Pour éviter tout givrage l'ensemble du montage était placé sous boîte à gants.

Nous avons également employé la méthode de Von Hippel, en utilisant une épaisseur d'échantillon unique et en mesurant non seulement s , mais aussi l . L'ensemble des deux méthodes nous a fourni $\varepsilon' = 2,7$, $\varepsilon'' = 1,7$.

Ces chiffres montrent que la fréquence critique de relaxation dans ce solide est probablement de

l'ordre de 10 000 MHz, c'est-à-dire plus élevée que dans de nombreux liquides.

En conclusion, le montage décrit présente les deux avantages suivants :

a) Il est aisément utilisable à des longueurs d'onde plus courtes.

b) L'onde expérimentale et l'onde de référence ayant une propagation de même type (libre), on n'a pas à craindre, lorsqu'on les compare, les distorsions de phase ou d'amplitude produites par le passage d'un type de propagation à un autre.

Ce montage a par contre l'inconvénient de nécessiter une bonne adaptation d'impédance aux interfaces et un alignement soigneux des différents éléments. Ce dernier pourrait d'ailleurs être facilité en remplaçant le miroir M_M par un réflecteur triréflé [12].

Manuscrit reçu le 4 mars 1966.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BLED (J.), BRESSON (A.), PAPOULAR (R.) et WEGROWE (J. G.), *L'Onde Electrique*, janvier 1964.
- [2] VAUGHAN (W. E.), LOVELL (W. S.) et SMYTH (C. P.), *J. Chem. Physics*, 1962, **36**, 2.
- [3] CONSTANT (E.) et WAVRECHIN (R. de), *C. R. Acad. Sc.*, 1961, **252**, 2690.
- [4] PAPOULAR (R.), *C. R. Acad. Sc.*, 1962, **254**, 1963.
- [5] TALPEY (T. E.), *IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, MTT2,4, 1954.
- [6] SEXTON (J. A.), BOND (R. A.), COATS (G. T.) et DICKINSON (R. M.), *J. Chem. Physics*, 1962, **37**, 9.
- [7] GARG (S. K.), KILP (H.) et SMYTH (C. P.), *J. Chem. Physics*, 1965, **43**, 7.
- [8] ROBERTS (S.) et VON HIPPEL (A.), *J. Appl. Physics*, 1946, **17**, 610.
- [9] POLEY, *Appl. Sc. Res.*, La Haye ; B. E. 173, 1955.
- [10] BROU, *Ann. Physique*, 1957, **54**, 120.
- [11] POWLES, WILLIAMS et SMYTH, *J. Chem. Physics*, 1953, **21**, 136.
- [12] KLOZA (M.), *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1964, **12**, 141.