

Étude expérimentale et numérique sur l'utilisation d'un stimulus thermique pour la mesure de charges d'espace dans des liquides diélectriques. Application à la Double Couche Électrique

Xavier Sidambaroupoulé

Les charges électriques présentes naturellement aux interfaces liquide/solide ou qui se développent dans les liquides de façon contrôlée ou non-désirée sont sources, d'une part, de nombreuses applications (micro-pompages, laboratoires sur puce, super-condensateurs...), et d'autre part de risques industriels (inflammations, explosions...). Ceci nécessite une quantification aussi précise que possible des valeurs et des répartitions de ces charges dans les milieux diélectriques liquides. Les techniques de mesure actuelles sont soit non-résolutives, les réponses mesurées sur l'ensemble de l'éprouvette permettant de déduire des informations sur les charges et les processus associés de manière indirecte (au travers de modèles), soit limitées en termes de sensibilité et/ou de résolution. Par exemple, le modèle de la double couche électrique, proposé par Stern en 1924 et complètement accepté par la communauté scientifique depuis, n'a encore jamais été confirmé expérimentalement, notamment en raison du manque de résolution et de sensibilité des méthodes existantes.

Plusieurs techniques ont été développées depuis 1980 pour mesurer de façon directe et non-destructive les charges électriques dans les isolants solides. Parmi ces méthodes, celles basées sur l'application de stimuli thermiques de faible amplitude ont montré les meilleures sensibilités et les meilleures performances pour la mesure des charges près des interfaces. L'application de ces techniques aux liquides est une voie de recherche à explorer afin de répondre aux questionnements scientifiques et applicatifs évoqués. Ce travail étudie, aussi bien du point de vue théorique qu'expérimental, l'application du principe de l'onde thermique à la mesure de charges électriques dans les liquides isolants. La double couche électrique, qui s'établit au niveau des parois liquide/solide, est utilisée comme objet d'étude. Plusieurs liquides diélectriques sont concernés : cyclohexane à l'état liquide et solide, huile minérale pure et additivée et huile silicone.

À travers des simulations numériques, les réponses électriques susceptibles d'être issues de l'application de stimuli thermiques de quelques degrés à des liquides isolants sont calculées, en considérant la couche diffuse présente à l'interface avec les parois. L'influence de différents paramètres de la double couche électrique sur les signaux simulés est étudiée. Les effets de la thermo-convection sont quantifiés en particulier et des critères permettant de les identifier dans les réponses électriques sont établis.

Des résultats expérimentaux, obtenus avec une installation de mesure conçue et réalisée spécialement pour les liquides, montrent que les réponses issues de l'application d'onde thermique de faibles amplitudes à des liquides isolants sont bien mesurables. Leur analyse détaillée permet de conclure que ces réponses proviennent bien des charges de la double couche électrique. La contribution probable aux signaux mesurés non seulement de la couche diffuse, mais également de la couche compacte, est mise en évidence. Les résultats permettent de conclure que les méthodes à stimuli thermique sont applicables

aux liquides diélectriques. La poursuite de leur développement devrait aboutir à des mises en œuvres expérimentales avec des résolutions et des sensibilités adaptées à l'étude des charges et des champs électriques aux interfaces et dans le volume de ces matériaux.

The electrical charges naturally present at liquid/solid interfaces or which develop in liquids in a controlled or undesired way are at the origin both of numerous applications (micro-pumps, lab-on-a-chip, super-capacitors) and of industrial risks (inflammations, explosions). This requires the most precise possible quantification of the values and distributions of these charges in liquid dielectric media. The present measurement techniques are either non-resolutive, as the responses measured on the entire specimen allow to deduce information about the charges and the associated processes indirectly (through models), or limited in terms of sensitivity and resolution. For example, the electrical double layer model, proposed by Stern in 1924 and fully accepted by the scientific community since then, has not been confirmed experimentally yet, in particular due to the lack of resolution and sensitivity of the existing methods.

Several techniques have been developed since 1980 to measure directly and non-destructively the electrical charges in solid insulators. Among these methods, those based on the application of low-amplitude thermal stimuli have shown high sensitivity and performance for the measurement of loads near interfaces. The application of these techniques to liquids is a research path to be explored in order to answer the above scientific and applicative questions. This work studies, both from theoretical and experimental points of view, the application of the thermal step principle to the measurement of electrical charges in insulating liquids. The electrical double layer, which sets up at the level of the liquid/solid walls, is used as object of the study. Several dielectric liquids are concerned: cyclohexane in liquid and solid state, pure and additive mineral oil and silicone oil.

Through numerical simulations, electrical responses expected from the application of thermal stimuli of several degrees to insulating liquids are calculated, considering the diffuse layer present at the interface with the walls. The influence of different parameters of the electrical double layer on the simulated signals is studied. In particular, the effects of thermo-convection are quantified and criteria to identify them in the electrical responses are established.

Experimental results, obtained with a measuring installation designed and built specifically for liquids, prove that the responses resulting from the application of low-amplitude thermal steps to insulating liquids are well measurable. Their detailed analysis leads to the conclusion that these responses are indeed due to charges from the electrical double layer. The probable contribution to the measured signals not only of the diffuse layer, but also of the compact layer, is highlighted. The results allow to conclude that thermal stimuli methods are applicable to dielectric liquids. Their further development should lead to experimental implementations with resolutions and sensitivities adapted to the study of electric charges and fields at the interfaces and in the volume of these materials.