



**HAL**  
open science

## Sur les différentes techniques de validation de la méthode de l'onde thermique

A. Cherifi, J. Santana

► **To cite this version:**

A. Cherifi, J. Santana. Sur les différentes techniques de validation de la méthode de l'onde thermique. Journal de Physique III, 1993, 3 (6), pp.1057-1064. 10.1051/jp3:1993182 . jpa-00248978

**HAL Id: jpa-00248978**

**<https://hal.science/jpa-00248978v1>**

Submitted on 4 Feb 2008

**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

61.40K — 77.50 — 72.20J — 66.70

## Sur les différentes techniques de validation de la méthode de l'onde thermique

A. Cherifi et J. Santana

Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 2, France

(Reçu le 22 mai 1992, révisé le 2 novembre 1992, accepté le 13 novembre 1992)

**Résumé.** — La mesure des charges d'espace dans les isolants synthétiques est une nécessité si l'on veut étendre nos connaissances sur ces matériaux et sur des phénomènes importants tel que le claquage. Dans cet article, nous montrons la précision et la fiabilité de la méthode de l'onde thermique en mettant en valeur un ensemble de validations. La validation expérimentale consiste à placer entre deux plaques isolantes déchargées, d'épaisseurs inconnues, une feuille d'aluminium portée à un potentiel connu avant la mesure. Il s'agit de mesurer ces charges et d'en déduire ainsi les épaisseurs de chaque échantillon. Nous validons les traitements numériques par des simulations. En partant d'une distribution de charge connue, on calcule le courant correspondant, puis on en déduit le champ électrique et la charge d'espace issus de ce courant que l'on compare aux distributions originales. Enfin la comparaison de résultats obtenus à partir d'un courant expérimental traité par deux méthodes numériques différentes (par séries de Fourier et par dérivation) vient conclure cette étude.

**Abstract.** — The measurement of space charge location in insulating material is necessary to know phenomenon which are important such as the breakdown. In this article, we show the precision and the reliability of the thermal step method by using some validations. The experimental validation consists in putting, between two insulating slabs of unknow thickness, a plane of charges realized by an aluminium sheet which has been submitted to a high tension before the measure. The experiment holds in the order to determine charges and to deduce the thickness of each slab. We valid the numerical treatments by simulations ; by using a known distribution of charge, we calcul the current ; from this current we determine the new distribution of charge which is compared to the first one. We valid also the thermal step method by using two different numerical treatments (by Fourier and by derivation) which are applied to an experimental current.

### 1. Introduction.

Pour satisfaire la demande croissante en énergie électrique tout en limitant les pertes par transport, on a recours à la haute tension. Malheureusement les risques de claquage des matériaux qui assurent l'isolation augmentent. On a tout lieu de penser que la charge d'espace qui s'est installée dans ces matériaux est certainement responsable de ces ruptures électriques.

Son étude est donc primordiale pour permettre le développement des isolants synthétiques.

La méthode non destructive sur laquelle nous travaillons a été mise au point au Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier. Elle est basée sur la mesure de courants de thermodilatation du matériau après lui avoir appliqué un échelon thermique sans dépasser la température ambiante (25 °C) et sans avoir recours au découpage de l'échantillon. Elle est appelée méthode de l'onde thermique [1]. L'objectif des travaux que nous présentons est de tester et démontrer l'efficacité de cette méthode. Pour cela, nous avons d'abord effectué des essais de validation numérique sur des courants simulés, ensuite des tests de validation expérimentale sur des courants expérimentaux. Pour les essais de validation numérique, nous utilisons deux méthodes de déconvolution différentes.

## 2. Principe de la méthode de l'onde thermique.

Soit une feuille isolante d'épaisseur  $D$ , et de surface  $S$  placée entre deux électrodes situées respectivement à  $x = 0$  et  $x = D$ . Toutes les grandeurs physiques sont supposées varier seulement suivant l'abscisse  $x$ . Soit une charge élémentaire de valeur  $dQ_1 = S\rho(x) dx$  ( $\rho$  est la densité volumique de charge de la couche plane d'épaisseur  $dx$ ) et d'abscisse  $x$  dans la plaque. Les électrodes supposées en court-circuit sont reliées par un appareil de mesure de courant de faible impédance. A partir de la condition de court-circuit et à l'aide du principe de l'influence totale les charges images induites sur les électrodes sont respectivement :

$$dQ_{11} = - (D - x) S\rho(x) dx/D \quad \text{et} \quad dQ_{12} = - xS\rho(x) dx/D . \quad (1)$$

Elles dépendent donc entre autres de  $x$ . En conséquence, la variation de  $x$  qui modifie l'équilibre des charges implique la variation des charges images  $dQ_{11}$  et  $dQ_{12}$ , ce qui donne lieu à un courant dans le circuit extérieur. Ce courant est mesuré et enregistré pour être traité.

La variation de  $x$  est rendue possible par contraction (respectivement par dilatation) de l'éprouvette à l'aide d'un front de température  $\Delta T_0$ , en faisant apparaître brusquement une source froide (respectivement chaude) près d'une des deux électrodes. A partir du courant mesuré, si on connaît exactement la fonction de répartition spatiale et temporelle de la température, on peut calculer la valeur de la charge  $dQ_1$  et sa position  $x$ .

## 3. Expression du courant.

On considère l'éprouvette comme plaque infinie. Le courant qui circule entre les électrodes est :

$$I(t) = - \alpha C_0 \int_0^D E(x) \frac{\partial \Delta T}{\partial t} dx \quad (2)$$

où  $\alpha = \alpha_v - \alpha_\epsilon$ ,

$\alpha_v$  coefficient de dilatation linéaire du matériau.

$\alpha_\epsilon$  coefficient de variation thermique de la permittivité.

$C_0$  = capacité de l'éprouvette,  $D$  = épaisseur de l'éprouvette,  $E(x)$  = champ électrique à l'abscisse  $x$ .

## 4. Validation numérique.

On calcule à partir des distributions de champ et de charge donnés, le courant que l'onde thermique génère pendant sa propagation. On traite ce courant simulé pour obtenir la répartition du champ et de la charge que l'on compare aux distributions d'origine. On a utilisé deux méthodes numériques différentes.

4.1 MÉTHODE NUMÉRIQUE PAR ANALYSE DE FOURIER. — Cette méthode nécessite la résolution de l'équation de la chaleur, en considérant deux sources de température [2].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = w \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3}$$

avec  $w = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}$ , où  $\mu$  = masse volumique du matériau,  $c$  = chaleur massique,  $\lambda$  = conductibilité thermique. On obtient :

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot \left( 1 - \frac{x}{L} - \frac{2}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \sin \left( \frac{n \cdot \pi}{L} \cdot x \right) \cdot \exp \left( - n^2 \frac{t}{\tau} \right) \right) \tag{4}$$

$\Delta T = T(x, t) - T_0$ ,  $\Delta T_0 = T_1 - T_0$  = échelon de température.  $\tau = \frac{w \cdot L^2}{\pi^2}$ ,  $T_0$  : température initiale de l'ensemble de l'échantillon ( $T_0 = T(x, t = 0)$ ),  $T_1$  : température qui apparaît brusquement sur l'une des deux électrodes ( $T_1 = T(x = 0, t)$ ).

Pour résoudre l'équation (1) le champ électrique est écrit sous forme d'une série de Fourier.

4.2 MÉTHODE NUMÉRIQUE PAR DÉRIVATION. — On considère le cas d'une seule source apparaissant près de la première électrode. On tient compte de l'avancée de l'échelon en restant dans les temps petits pour lesquels l'onde thermique n'a pas encore atteint l'autre électrode [3]. On a alors :

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \Delta T_0 \frac{x}{t} \left( \frac{w}{4 \pi t} \right)^{1/2} \exp \left( - \frac{wx^2}{4t} \right) . \tag{5}$$

Il faut que  $x < q$  avec  $q = \left( \frac{4kt}{w} \right)^{1/2}$ ,  $3,5 \leq k \leq 5$ . Pour résoudre l'équation (1), on procède par dérivations successives.

4.3 RÉSULTAT DE LA SIMULATION. — La figure 1 montre la répartition d'un champ électrique donné, celui calculé à partir du courant simulé en utilisant les séries de Fourier et celui en utilisant la 2<sup>e</sup> méthode.

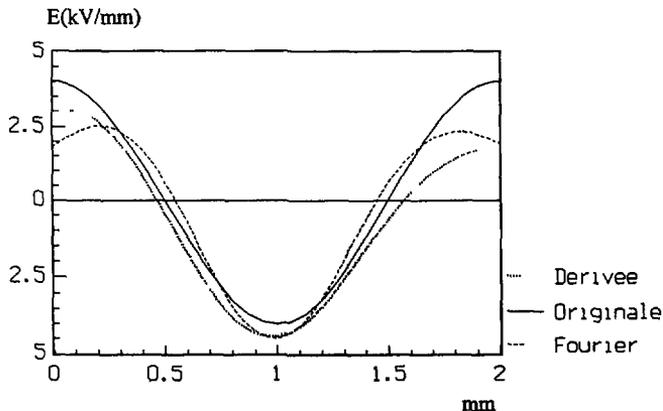


Fig. 1. — Champ électrique donné, resimulé à partir de la méthode des dérivations et par séries de Fourier.

[Assumed electric field, recalculated one by using Fourier series and derivation methods.]

La figure 2 montre la même chose pour la charge d'espace.

Les résultats montrent que les deux méthodes de déconvolution donnent des distributions similaires.

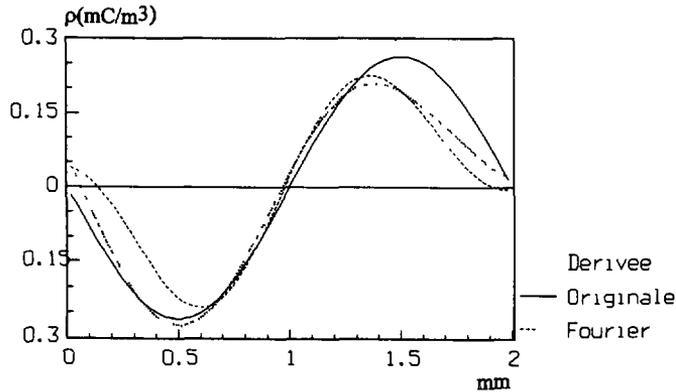


Fig. 2. — Charge d'espace donnée, resimulé à partir des deux méthodes numériques.

[Corresponding space charges.]

## 5. Validation expérimentale.

Parmi les expériences réalisées pour la validation expérimentale, deux des plus importantes sont :

- le test de détermination de charges de valeur et de position données ;
- la comparaison des résultats offerts par les deux modèles de déconvolution numérique déjà cités (séries de Fourier, dérivation), appliqués au même courant expérimental.

**5.1 TEST DE DÉTERMINATION DE LA POSITION ET DE LA VALEUR DES CHARGES.** — Cette opération se déroule en quatre phases :

**5.1.1 Préparation des échantillons.** — Initialement les échantillons ne doivent contenir aucune charge. Pour cela, deux échantillons de PEBD (polyéthylène basse densité) de 80 mm de diamètre et d'épaisseurs  $e_1 = e_2 = 2,1$  mm ont été mis en court-circuit à 85 °C pendant 10 h pour évacuer toutes charges éventuelles se trouvant à l'intérieur. Après cette période, nous avons vérifié à l'aide de la méthode de l'onde thermique que ces deux échantillons étaient bien dépourvus de charges.

Chaque éprouvette est munie de part et d'autre d'une couche mince d'aluminium déposée sous vide. Le diamètre de chaque couche métallisée est de 40 mm. Le centre de l'échantillon et de la couche métallisée sont confondus pour que les deux faces métallisées de chaque échantillon soient bien en face l'une de l'autre.

**5.1.2 Création de charges.** — Les deux échantillons sont plaqués l'un contre l'autre pour former un seul échantillon équivalent. Les deux couches centrales métallisées qui sont en contact sont portées à une tension continue  $V = 1$  kV, pendant que les couches externes sont reliées à la masse de la source de tension (voir Fig. 3a).

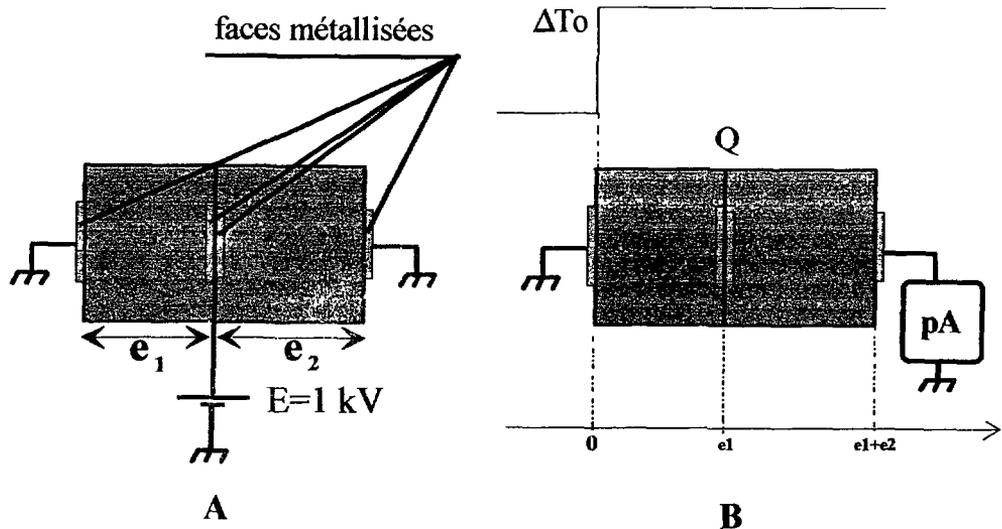


Fig. 3. — Validation expérimentale. a) Création de charge dans la couche centrale métallisée. b) Mesure pendant l'application de l'échelon de température.

[Experimental validation. a) Charge creation in the internal metallized coating. b) Measure during the thermal step propagation.]

Donc après cette opération, l'échantillon équivalent possède à l'intérieur une charge constante  $Q = (C_1 + C_2) V$  disposée dans un plan parallèle aux électrodes, situé à  $e_1$  de la 1<sup>re</sup> électrode et à  $e_2$  de la 2<sup>e</sup> électrode.  $C_1$  et  $C_2$  représentent la capacité de chaque éprouvette.

Le diamètre des échantillons (80 mm) a été choisi supérieur à celui des couches métallisées (40 mm) pour éviter au maximum la décharge des deux condensateurs (connectés en série pendant la mesure) qui peut être provoquée par conduction surfacique ou par contournement impliquant la variation de la charge  $Q$ , ce qui est indésirable.

**5.1.3 Mesure.** — Pendant la mesure, l'électrode en contact avec le diffuseur générant l'échelon de température est reliée à la masse de l'appareil de mesure de courant. L'autre électrode est reliée à l'entrée de cet appareil (voir Fig. 3b).

A partir d'un instant  $t = 0$ , l'acquisition du courant  $I(t)$ , et l'application de l'échelon de température sont pilotées par un ordinateur.

**5.1.4 Déconvolution.** — A partir des signaux enregistrés lors de la mesure il s'agit de trouver la position et la valeur de la charge  $Q$  stockée dans la couche interne métallisée. Ceci est fait en utilisant les logiciels de déconvolution que nous avons déjà testés en simulation.

On peut constater à travers les figures 4 et 5 que l'on a une très bonne concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales des inconnues. En effet le champ électrique s'inverse à une abscisse voisine de 2,1 mm (Fig. 4) et le pic de charge d'espace est nettement observable à cette abscisse (Fig. 5).

Pendant, dans la figure 4, de part et d'autre de l'abscisse 2,1 mm, on remarque une légère atténuation du champ électrique, alors que dans l'hypothèse de l'absence de tous phénomènes

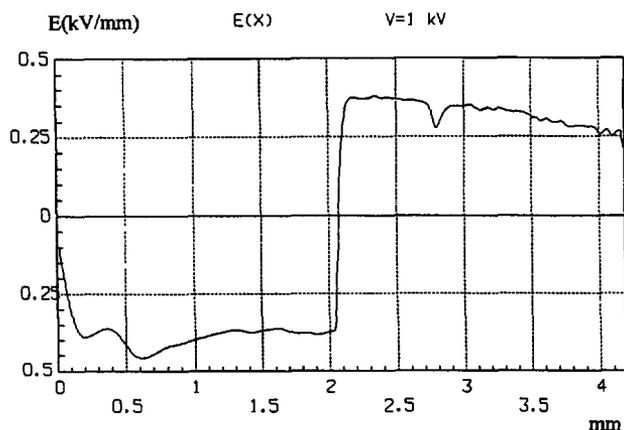


Fig. 4. — Champ électrique de la validation expérimentale.

[Electric field of the experimental validation.]

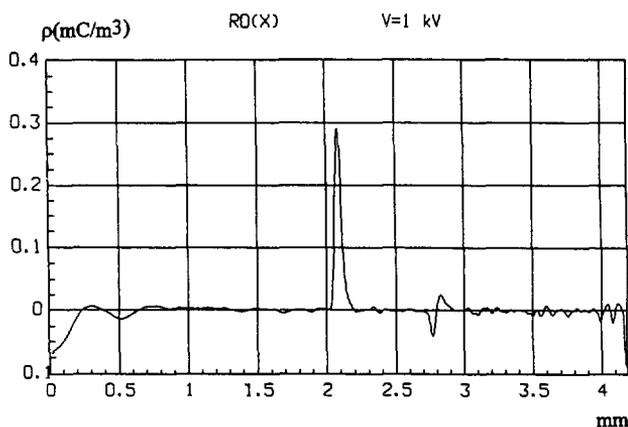


Fig. 5. — Charges d'espace de la validation expérimentale.

[Corresponding space charges for experimental validation.]

parasites (conduction, polarisation, contournement, ...), le champ est constant dans  $e_1$  et dans  $e_2$ . Les valeurs théoriques du champ dans ces deux régions sont : dans  $e_1$ ,  $E_1 = -\frac{1}{2,1} = -0,48$  kV/mm, dans  $e_2$ ,  $E_2 = \frac{1}{2,1} = 0,48$  kV/mm. Ceci est probablement dû à une légère conduction.

**5.2 COMPARAISONS DES DEUX MÉTHODES NUMÉRIQUES.** — Les figures 6 et 7 montrent respectivement la comparaison du champ électrique et des charges d'espace obtenus par les 2 traitements numériques différents appliqués sur le même courant mesuré  $I(t)$  : les profils trouvés des charges d'espace et des champs électriques sont semblables.

Le modèle mathématique basé sur la reconstitution du champ électrique à partir des séries de Fourier est un modèle rigoureux. Il a l'avantage d'être valable pour toute la durée de l'expérience. L'inconvénient par rapport à la méthode numérique par dérivation est le temps de calcul qui est plus long, à précision égale.

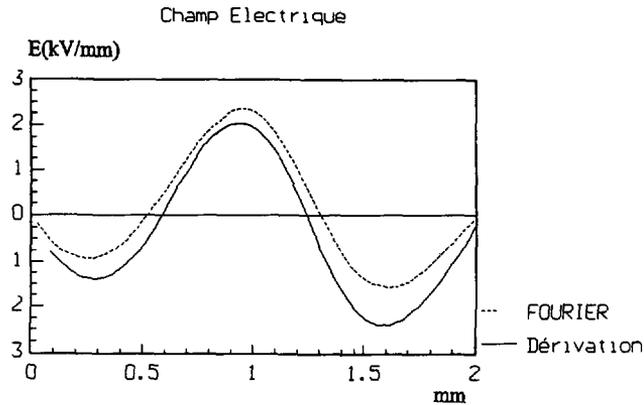


Fig. 6. — Champ électrique déterminé par les deux modèles numériques appliqués à un même courant expérimental (échantillon ordinaire).

[Electric fields calculated by using the two numeric models applied to the same experimental current (ordinary sample).]

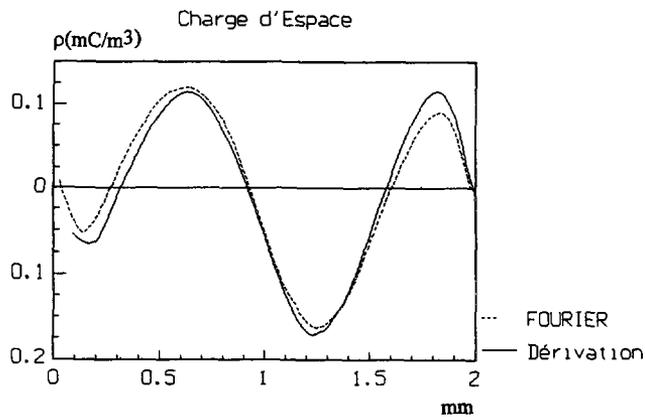


Fig. 7. — Charges d'espace correspondant au champ électrique de la figure 6.

[Corresponding space charges of the figure 6 electric field.]

Avec ces deux méthodes numériques, nous pouvons aussi déterminer la diffusivité thermique du matériau : les résultats sont concordants. Ainsi, la comparaison des résultats obtenus grâce aux deux traitements sert de validation numérique et expérimentale de la méthode.

## 6. Conclusion générale.

Nous venons d'établir les validations numérique et expérimentale de la méthode dite — Onde thermique — qui permet de mesurer les distributions de potentiel, de champ électrique et de charge d'espace dans les isolants solides avec une précision satisfaisante.

Cette précision s'améliore avec l'amplitude du signal, le rapport signal sur bruit. Elle est très bien adaptée aux fortes épaisseurs, en particulier pour les câbles haute tension. La faisabilité de

cette mesure sur des structures cylindriques a été récemment vérifiée sous plusieurs formes : chauffage externe [4] ou interne par courant dans l'âme centrale [5].

L'avantage le plus important de cette méthode par rapport aux autres est qu'elle franchit facilement les interfaces sans déformation ni réflexion ce qui laisse présager une technique d'avenir.

#### Bibliographie

- [1] TOUREILLE A., REBOUL J. P., MERLE P., Détermination des densités de charge d'espace dans les isolants solides par la méthode de l'onde thermique, *J. Phys. III France* **1** (1991) 111-123.
- [2] TOUREILLE A., REBOUL J. P., Symp. on electrets (ISE6) Oxford, *IEEE* (septembre 1988) pp. 23-27.
- [3] TOUREILLE A., Sur une méthode de détermination de densité spatiale de charge d'espace dans le polyéthylène (JICABLE, 1987) p. 98.
- [4] SABIR A., Sur une nouvelle méthode de mesure de charge d'espace dans les câbles haute tension, Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, L.E.M. (juillet 1991).
- [5] AGNEL S., Etude de la faisabilité de la mesure de charges d'espace sur les câbles haute tension par chauffage de l'âme centrale, rapport de DEA, Université Montpellier II, L.E.M. (juin 1990).