

L'EFFET DIÉLECTRIQUE D'INVERSION DE L'ATTÉNUATION DES ONDES
ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Lyes DOUADJI, Michel DELMOTTE

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux

151, Boulevard de l'Hôpital 75013 Paris

(Tél : +331.44.24.64.25, Fax : +331.44.24.63 82, Email michel.delmotte@paris.ensam.fr)

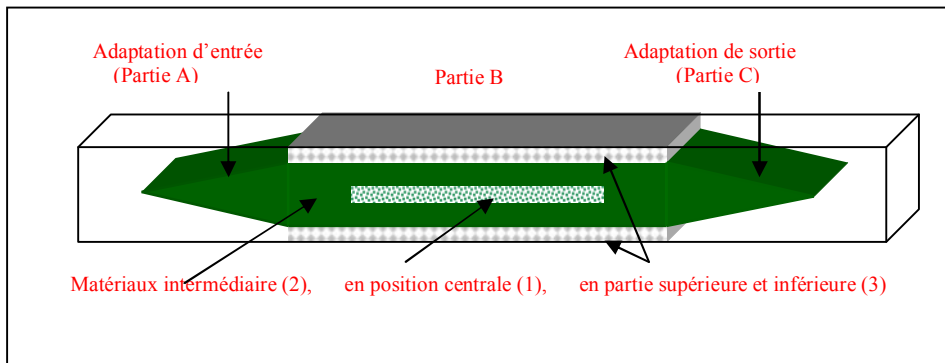
Résumé – L'effet diélectrique d'inversion de l'atténuation des ondes électromagnétiques. Dans le cadre de la transformation thermique des matériaux par valorisation de l'hystérésis diélectrique, la nécessité d'utilisation d'ondes électromagnétiques hyperfréquences conduit à la formation de deux structurations spatiales de la distribution des ondes. L'un des effets se manifeste par la présence de ventres et de nœuds de champ électrique. Le second est la décroissance spatiale de l'amplitude du champ électrique, appelée atténuation des ondes électromagnétiques et qui résulte de la simple conservation de l'énergie, ici la transformation d'énergie électrique en enthalpie. Le présent travail propose une maîtrise de cette décroissance, jusqu'à son inversion apparente, à l'aide d'une distribution spatiale spécifique d'un outillage constitué de plusieurs matériaux diélectriques faiblement absorbants. Ces matériaux diélectriques et l'objet à transformer thermiquement sont disposés dans un applicateur hyperfréquence dont les dimensions n'autorisent que la propagation du mode fondamental des ondes. Le calcul numérique du champ électrique en tout point de l'applicateur montre, suivant les trois directions de l'espace, comment se répartit ce champ entre les matériaux diélectriques et l'objet à transformer ainsi que suivant l'axe de propagation des ondes. Suivant cet axe se manifeste l'atténuation des ondes et aussi l'inversion de cette dernière lorsque les paramètres diélectriques sont convenablement choisis.

Mots clés: ondes électromagnétiques, atténuation, diélectriques, micro-ondes

1. Introduction

Pour obtenir la plus grande uniformité spatiale possible de la transformation thermique d'un matériau, par hystérésis diélectrique, une des premières conditions à respecter est la réalisation d'une distribution spatiale de la norme de champ électrique, dont dépend directement l'élévation de température ou l'enthalpie créées, la plus uniforme possible. Une propagation d'une onde électromagnétique dans un applicateur parallélépipédique vide conduit à la distribution spatiale du champ électrique la plus uniforme dans le cas où le mode fondamental peut être maintenu [1]. Hors du cas du mode fondamental, apparaissent toujours des zones à champ fort et des points à champ nul qui créent une distribution spatiale du champ électrique naturellement moins uniforme. Dans le cas d'un applicateur rempli symétriquement et complètement par trois diélectriques différents (*figure I*), la distribution spatiale du champ électrique dans l'applicateur

Figure I. Schéma de principe d'un applicateur hyperfréquence parallélépipédique rempli de trois diélectriques

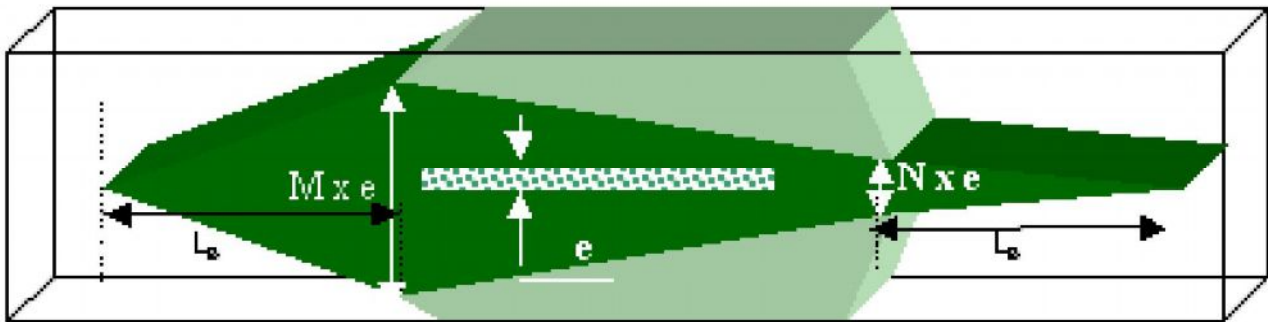


dépend [2] des propriétés diélectriques et des dimensions des matériaux de remplissage mais il est toujours envisageable de maintenir cette plus grande uniformité possible, en respectant des conditions concernant ces caractéristiques. En effet, si nous distinguons les trois directions de l'espace, dans la première direction, perpendiculaire aux grandes dimensions de l'applicateur parallélépipédique et de la section rectangulaire de ce dernier, le champ électrique est

constant, et le vecteur champ électrique est porté par cette même direction (Ox). Dans la direction (Oy), perpendiculaire à la première direction et à la grande dimension de l'applicateur, l'amplitude du champ électrique suit une loi sinusoïdale à un seul maximum ou une loi approchée présentant un maximum plus élargi dépendant de la constitution des matériaux diélectriques de remplissage. Dans la troisième direction (Oz), l'amplitude du champ suit classiquement une atténuation exponentielle dans la direction de la propagation due à l'absorption de l'énergie dans la direction de la propagation par les matériaux constituant l'objet à transformer et par les matériaux diélectriques faiblement absorbants.

La modélisation électromagnétique a montré que la distribution longitudinale du champ électrique et donc l'atténuation des ondes dans l'objet à transformer thermiquement, placé en position centrale et appelé matériau (1) sur la figure I, dépendent fortement et en première importance de l'épaisseur du matériau diélectrique (matériau (2) sur la figure I) qui entoure et est en contact direct avec l'objet à transformer. En conséquence, si on réalise une variation de l'épaisseur de ce matériau diélectrique, dans le sens de la propagation des ondes électromagnétiques (figure II), nous pouvons obtenir

Figure II. Schéma de principe d'un applicateur hyperfréquence à matériau diélectrique intermédiaire (matériau (2) ou Partie B de la figure I) d'épaisseur décroissante



une atténuation nulle dans l'objet à transformer thermiquement[3]. A partir d'une valeur spécifique des dimensions du matériau (2), nous observons une atténuation dans le sens inverse de la propagation électromagnétique. Cette situation est appelée l'effet diélectrique d'inversion de l'atténuation des ondes électromagnétiques. Enfin, la présence des interfaces, entre les divers matériaux diélectriques, de permittivités non strictement égales, engendrent des ondes stationnaires qualifiées par le Taux d'Ondes Stationnaires (TOS), voisin mais supérieur à 1. La résolution de ce problème n'est pas abordée ici, toutefois les résultats sont tous marqués par cet effet.

2. Le modèle

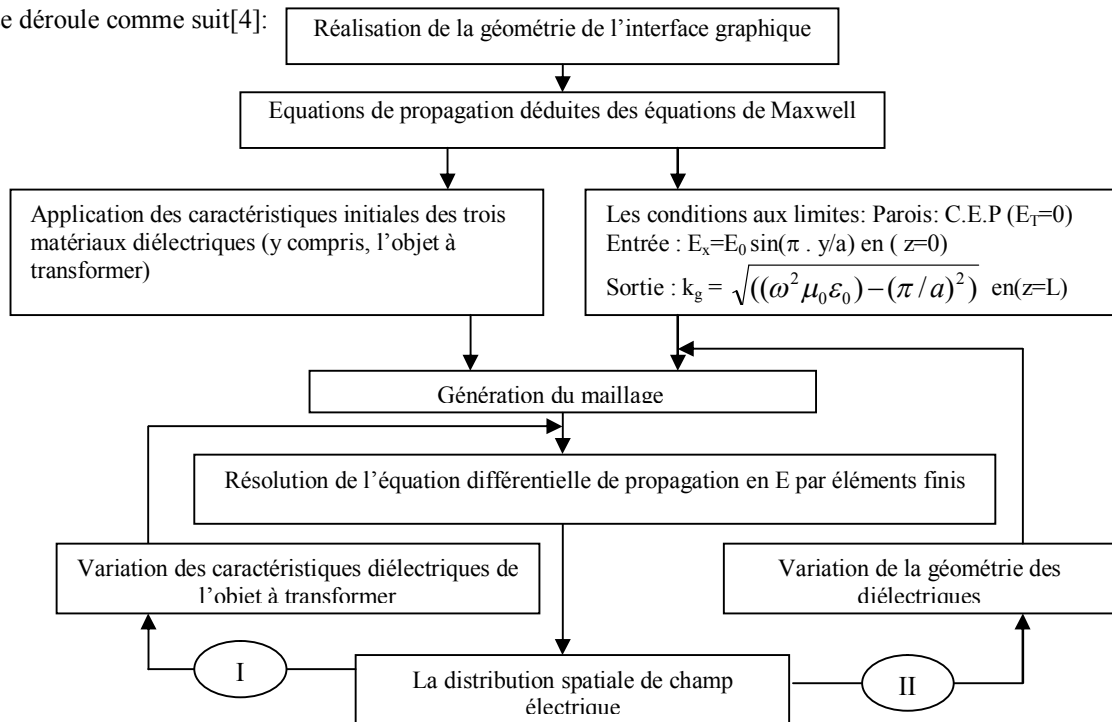
La modélisation des champs électromagnétiques dans un applicateur hyperfréquence a fait appel à l'outil informatique FEMLAB. Ce logiciel est un développement interne de MATLAB, dédié à la modélisation et la simulation de tout phénomène multiphysique descriptible sous la forme d'Equations aux Dérivées Partielles (EDP). Il utilise une approximation par la méthode des éléments finis, avec un maillage automatique en triangles ou en tétraèdres. L'uniformité du champ électrique selon la première direction décrite plus haut permet également une modélisation électromagnétique en deux dimensions (2D) de l'applicateur, qu'il soit rempli des trois diélectriques ou non. Cela permet une progressivité de la complexité des opérations et une réduction significative du temps de calcul.

2.1. Les conditions aux limites

Les parois de l'applicateur sont métalliques; elles sont traitées comme un conducteur électrique parfait assimilé à un milieu de permittivité infinie. La quasi-totalité de l'onde incidente est réfléchi. La quasi-totalité de l'onde transmise au sein du matériau conducteur est dissipée sur une très faible épaisseur correspondant à l'effet de peau et reste très faible. On gardera toujours l'hypothèse de la composante tangentielle du champ électrique nulle ($E_{tg} = 0$). A l'entrée de l'applicateur, le magnétron et le dispositif appelé circulateur assurent une source micro-onde ainsi située à $z = 0$ et représentée par E_x , fonction sinusoïdale de l'ordonnée y , à un seul maximum ($E_{max} = 9120 \text{ V.m}^{-1}$), correspondant à une puissance de 1250W pour l'ensemble de l'applicateur, terminé par une charge à eau qui absorbe les ondes transmises et permet un régime d'ondes progressives dans l'applicateur.

2.2. La procédure de calcul

La procédure se déroule comme suit[4]:



Une variation de la géométrie initiale nous permet d'étudier l'influence des paramètres diélectriques et géométriques du montage, par exemple les épaisseurs des matériaux (1) et (2) à partir des chemins I et II ci-dessus.

3. Résultats

3.1. Profils transversaux du champ électrique

Les figures III et IV représentent la distribution transversale de la norme du champ électrique pour des valeurs

Figure III. Norme transversale du champ électrique

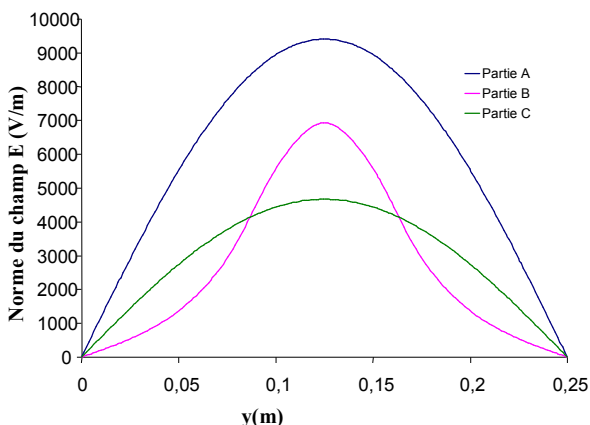
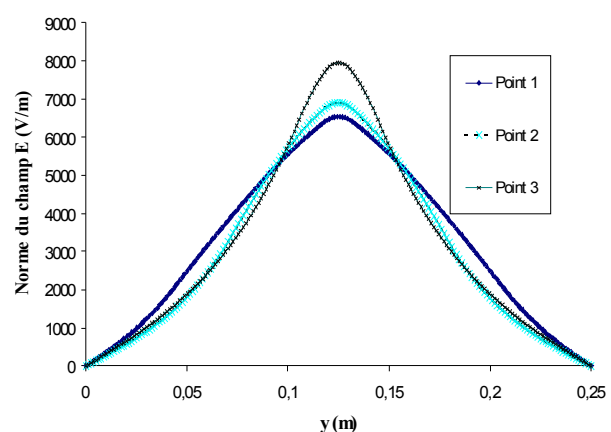


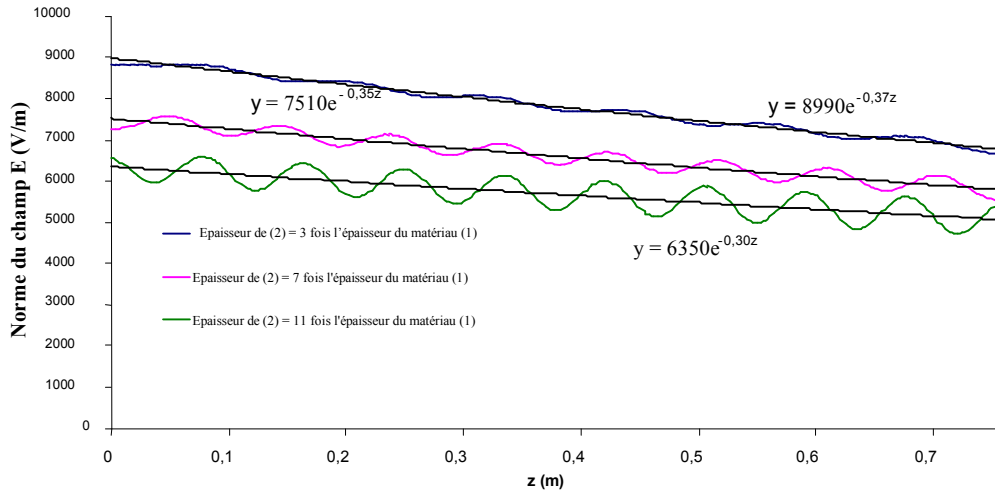
Figure IV. Norme transversale du champ électrique dans la Partie B pour la configuration de la figure II



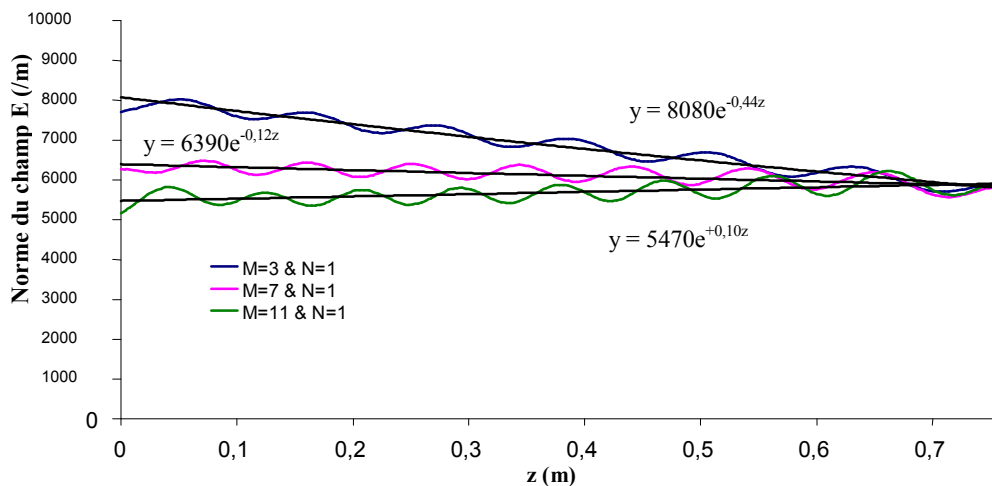
différentes de la cote z . Les courbes de la figure III sont obtenues à l'entrée de l'applicateur (Partie A), au centre de la Partie B et à la sortie de l'applicateur (Partie C). La figure IV correspond à trois valeurs de la cote z , pour une configuration telle que la figure II; la norme la plus importante du champ électrique est celle de la sortie de la Partie B.

3.2. Profils longitudinaux du champ électrique

Deux exemples d'atténuation de la norme du champ électrique sont donnés ci-après (figures V et VI) pour des

Figure V. Norme longitudinale du champ électrique pour un remplissage uniforme de l'applicateur (figure I)

remplissages correspondant aux situations respectivement des figures I et II. On observe ainsi trois atténuations habituelles définies par une fonction exponentielle à argument négatif sur la figure V, tandis que la figure VI montre une courbe exponentielle à argument positif. C'est l'effet diélectrique d'inversion de l'atténuation des ondes (EDIA).

Figure VI. Norme longitudinale du champ électrique pour un remplissage non uniforme de l'applicateur (figure II)

4. Conclusion

Nous obtenons ainsi une justification numérique de l'effet diélectrique d'inversion de l'atténuation des ondes (EDIA), associé à une modification progressive du profil transversal du champ électrique et aussi à une réduction de la norme de champ électrique bien visible à l'interface d'entrée du matériau (1) en position centrale, ce qui conduit aussi à une réduction du rendement thermique du système [5].

Bibliographie

- [1]. J. P. PEREZ, R. CARLES and R. FLECKINGER, Electromagnétisme- Fondements et applications, 3eme édition, MASSON.
- [2]. M. DELMOTTE, L. OUTIFA and C. MORE, 09.09.1993, Brevet Français, N°93/10710.
- [3]. M. DELMOTTE, L. OUTIFA, C. MORE, and D. DELAUNAY, 08.06.1994, Brevet Français, N° 407008.
- [4]. L., DOUADJI, M. DELMOTTE, AJAM, 3, pp.293-296, 2006.
- [5] L., DOUADJI, M. DELMOTTE, SFT2006, pp.799-804, Ile de Ré (France), 16-19 mai 2006.