

RECHERCHE DE LA DIRECTION D'INCIDENCE DE PLUS FORT COUPLAGE A L'AIDE DU THEOREME DE RECIPROCITE

Jean-Pierre ADAM¹, Jean-Christophe JOLY², Bernard PECQUEUX², Didier ASFAUX¹

¹IEEA, 13 promenade Paul Doumer, 92400 Courbevoie, France
²Centre d'Etudes de Gramat, DGA/DET/CEG, 46500 Gramat, France

1) INTRODUCTION

Le théorème de réciprocité est un puissant outil de simplification de problème en électromagnétisme. De nombreuses formes de ce théorème existent. Elles sont généralement présentées en régime harmonique. On montre ici son application dans le domaine temporel. En effet, on s'intéresse à la valeur maximale du courant traversant un fil ou de la tension aux bornes d'une charge lorsque le système est éclairé par une onde plane (cas qu'on nommera « réception »). Le théorème de réciprocité permet de déterminer l'influence de la direction d'incidence et de la polarisation de l'onde plane à l'aide d'un seul cas de calcul où la mesure est remplacée par un générateur (cas qu'on nommera « émission »).

2) THEOREME DE RECIPROCITE DANS LE DOMAINE TEMPOREL

Dans le domaine des antennes, ce théorème permet de déduire le comportement d'une antenne en réception à partir de son comportement en émission. En effet, il est possible de montrer (cf. [1]) que pour un champ incident E_0 provenant de la direction u , l'antenne se comporte comme un générateur de force électromotrice V_{co} exprimée de la manière suivante :

$$V_{co}(\omega) = \frac{4\pi c}{j\omega Z_0} \frac{\vec{F}(\omega) \cdot \vec{E}_0(\omega)}{I_t(\omega)} \quad (1)$$

où F est déduit de :

$$\vec{E}_t(\omega) = \frac{\exp(-ikr)}{r} \vec{F}(\omega) \quad (2)$$

Et est le champ lointain rayonné par l'antenne à une distance r dans la direction u , lorsque celle-ci est alimentée par une source de courant I_t . Z_0 désigne l'impédance du milieu.

Le passage de cette expression dans le domaine temporel fait apparaître des convolutions. Pour éviter cet inconvénient, on impose la condition suivante : la forme temporelle du courant I_t traversant l'antenne en émission est la même que celle de l'onde incidente E_0 arrivant sur l'antenne en réception. On obtient alors la simplification suivante :

$$V_{co}(\omega) = \frac{4\pi c}{j\omega Z_0} r E_t(\omega) \quad (3)$$

soit dans le domaine temporel :

$$V_{co}(t) = \frac{4\pi c}{Z_0} r \int_0^t E_t(\tau) d\tau \quad (4)$$

On notera qu'on a volontairement oublié le terme de phase du à la propagation. Celui-ci introduit simplement un retard dans le domaine temporel. Par ailleurs, pour simplifier l'expression, le produit scalaire a été omis. Il est cependant indispensable pour tenir compte de la polarisation de l'onde incidente.

Le même raisonnement permet de trouver le courant de court-circuit traversant une antenne soumise à une onde plane à partir du champ que cette antenne émet lorsqu'elle est alimentée par une source de tension. En ajoutant une résistance en série à ce générateur de tension, le courant de court-circuit déduit par réciprocité devient un courant sur charge.

Enfin, la tension en circuit ouvert aux bornes d'un petit dipôle est proportionnelle à la composante du champ électrique parallèle à ce dipôle. Ainsi, en calculant le champ rayonné par ce petit dipôle alimenté par un générateur de courant et en appliquant le théorème de réciprocité, on peut évaluer le comportement du champ électrique lorsque le système est soumis à une onde plane.

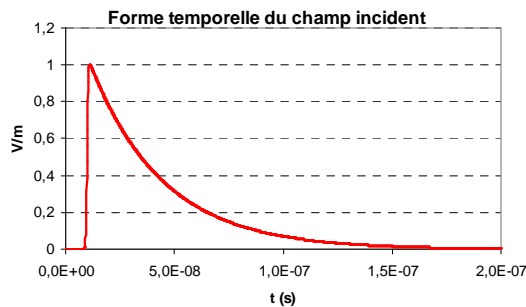
3) APPLICATIONS

Les approches temporelles du théorème de réciprocité sont généralement utilisées dans le domaine des antennes Ultra Large Bande (ULB) (cf. [2]). Dans cette étude, on s'intéresse à la vulnérabilité d'un système soumis à une Impulsion Electromagnétique (IEM).

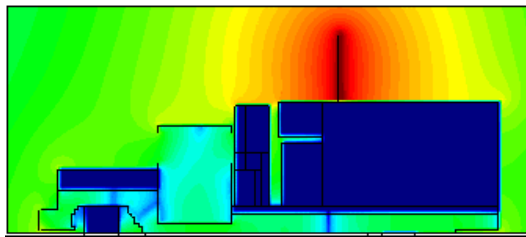
Les cas d'application sont réalisés avec le code de calcul Gorf3D du CEG basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). A l'aide d'une transformation champ proche / champ

lointain, cet outil peut calculer un champ rayonné à l'extérieur du volume de calcul.

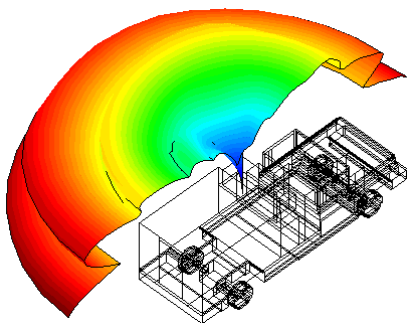
Le terme « antenne » n'est pas limité à l'élément rayonnement : il peut englober toute la structure qui porte cet élément. On considère l'exemple présenté sur la figure 1. Il s'agit d'un camion porteur d'une antenne monopole. Un seul cas de calcul en émission a permis de trouver la tension en circuit ouvert à la base de l'antenne en réception, quelle que soit la direction d'incidence de l'onde plane. Dans cette étude, on s'est intéressé à la valeur maximale de cette tension, mais ceci n'est pas une contrainte : tout autre traitement est possible.



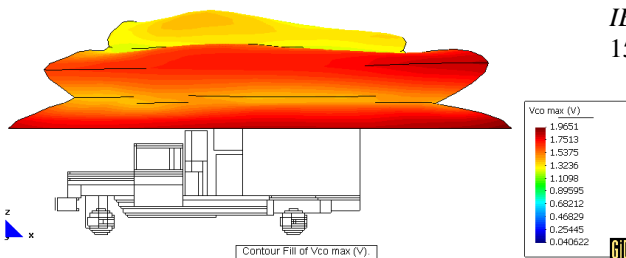
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 1: (a) forme temporelle du champ incident (en réception) et du courant (en émission). (b) champ

électrique (échelle logarithmique) à un instant donné du calcul du rayonnement d'un fil placé sur un camion et alimenté par une source de courant. (c) et (d) valeur maximale de la tension en circuit ouvert à la base du fil en fonction de la direction d'incidence (polarisation verticale). Le résultat de (c) et (d) est déduit du calcul illustré par (b) à l'aide du théorème de réciprocité.

Les simulations ont été réalisées sur un PC équipé d'un processeur AMD Athlon64 3500+. Le nombre de mailles est d'environ 1.5 millions. Pour obtenir le même résultat que celui de la figure 1 sans utiliser le théorème de réciprocité, 855 exécutions de 10 minutes seraient nécessaires, soit un total de 142 heures. Le cas de calcul en émission nécessite de 30 minutes à 16 heures, suivant la configuration de la transformation champ proche / champ lointain qui est très coûteuse en temps de calcul. Ainsi, même si un calcul en émission dure plus longtemps, l'utilisation du théorème de réciprocité devient avantageuse lorsque le nombre de directions d'incidence à considérer est important.

4) CONCLUSION

Le théorème de réciprocité a été appliqué dans le domaine temporel pour évaluer rapidement l'influence de la direction d'incidence d'une onde plane. Cependant cette méthode ne donne une information qu'au point d'excitation. Elle ne permet pas de calculer une cartographie de champ électrique par exemple. Ceci semble être la principale limitation. Mais elle est parfaitement adaptée au cas où on s'intéresse à l'influence de la direction d'incidence sur la tension ou le courant en un point particulier, par exemple l'entrée d'un équipement vulnérable.

REFERENCES

[1] S.W. Lee, "Theorems and Formulas", in *Antenna Handbook, Antenna fundamentals and mathematical techniques*, vol. 1, chap. 2, Edited by Lo and Lee, Chapman & Hall, 1993.

[2] Glenn S. Smith, "A Direct Derivation of a Single-Antenna Reciprocity Relation for the Time Domain", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 52, no. 6, pp. 1568- 1577, june 2004