Ecole Nationale Supérieure de l'Electronique et de ses Applications

CEM des systèmes

Méthode DF 3D pour la modélisation de cavités résonantes

Objectifs :

- Evaluation numérique des fréquences de résonance dans une cavité parallélépipédique
- Modéliser le comportement d'une cavité réverbérante (code FDTD 3D)

Compétences visées :

- Connaitre les éléments constitutifs d'un modèle électromagnétique : domaine de calcul, source, conditions initiales, conditions aux limites, convergence
- Développement et utilisation d'outils de simulation numérique (sous environnement Matlab / Octave) : code de calcul analytique & code de calcul « Full-Wave » FDTD 3D
- Post-traitement des données & sensibilisation aux grandeurs CEM (modes de résonance)

Contrôle des connaissances :

- Rendu d'un compte-rendu des travaux suite à la séance présentielle

---

A. Introduction

Une cavité électromagnétique peut être définie comme un volume au sein duquel un champ d'ondes stationnaires s'établit suite aux multiples réflexions sur les parois parfaitement conductrices de l'enceinte. La géométrie du volume peut être quelconque, mais nous considérerons uniquement le cas le plus courant, i.e. celui d'un parallélépipède rectangle (Figure 1). De plus, le milieu interne correspondant à l'air est assimilé au vide de permittivité électrique ε_0 et de perméabilité magnétique μ_0 (voir dans les TPs précédents).

B. Théorie modale d'une cage de Faraday sans pertes

Si on excite la cavité à l'aide d'une onde électromagnétique, des champs sont générés et vérifient l'équation de propagation de Helmholtz (voir cours) :

$$\Delta\mathbf{\Psi} + k^2\mathbf{\Psi} = 0 \qquad (1)$$

Où Ψ représente indifféremment le champ électrique **E** ou magnétique **H** et k la constante de propagation. Les solutions sont appelées les fonctions propres de l'équation et dépendent des valeurs propres k définies par :

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \tag{2}$$

Où ω correspond à la pulsation de l'onde, c la vitesse de la lumière dans le vide (3.10^8 m/s).

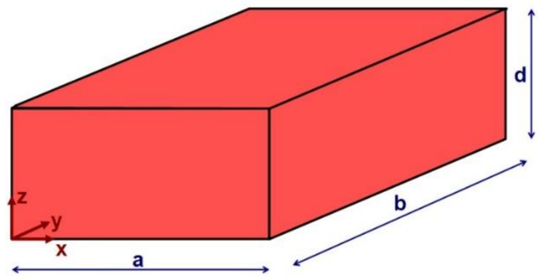


Figure 1. Cavité parallélépipédique dans un repère cartésien.

Pour chacune des directions de propagation (Ox), (Oy) et (Oz), il existe des solutions ou modes de type transverse électrique (TE) et de type transverse magnétique (TM). La solution générale est une combinaison linéaire de toutes ces solutions particulières.

La résolution de l'équation dans un repère cartésien en régime harmonique impose d'écrire la constante de propagation comme suit :

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \tag{3}$$

En appliquant les conditions aux limites sur les parois (ce qui revient à annuler les composantes tangentielles du champ électrique et normales du champ magnétique), les composantes du nombre d'onde doivent impérativement satisfaire les relations ci-dessous :

$$k_x = \frac{m\pi}{a} \qquad k_y = \frac{n\pi}{b} \qquad k_z = \frac{p\pi}{d} \qquad \text{avec } (m,n,p) \in N^3 \tag{4}$$

Dans une cavité, chaque mode n'existe que pour une unique fréquence dépendant du mode de la résonance (caractérisé par le triplet (m; n; p)) et des dimensions de la cage. A l'aide de (2), (3) et (4), on peut alors établir son expression :

$$f_{mnp} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \tag{5}$$

Ainsi, le champ dans la cavité s'identifie à un spectre de raies correspondant aux modes propres de résonance déterminés par les conditions aux limites.

- 0°) Définir un script (ou un script + une fonction) permettant de calculer les fréquences de résonance de la cavité en fonction des paramètres d'entrée (dimensions de la cavité) à partir de la relation (5).

  On pourra prendre un exemple sur la gamme de fréquence permettant de faire apparaître les 10 premiers modes de résonance en prenant m=n=p=5 par exemple. Ainsi, on prendra l'exemple des fréquences obtenues pour toutes les combinaisons possibles (m/n/p) = (0…5/0…5/0…5). Le premier travail consiste à générer l'ensemble de ces triplets, i.e. : 0/0/0 puis 0/0/1 et ainsi de suite …

Remarque 1 : attention, la génération d'un mode 'viable' dans la cavité nécessite qu'au moins deux paramètres (parmi m, n et p) soient non nuls. Adapter votre programme afin de supprimer les modes 'non physiques' (exemple : le mode m=0, n=0, p=1 n'existe pas).

Remarque 2 : Bien penser à annoter au fur et à mesure les différentes parties constitutives de l'outil de simulation.

Sauvegarder votre script sous tp00.m.

C. Code numérique : prise en main du logiciel FDTD.m

Le code FDTD.m permet de réaliser un calcul tridimensionnel Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD) comme vu dans le cours.

- 1°) Identifier les différentes parties du code de calcul (s'appuyer sur les commentaires fournis dans le programme).
  Sauvegarder votre script sous tp01.m.

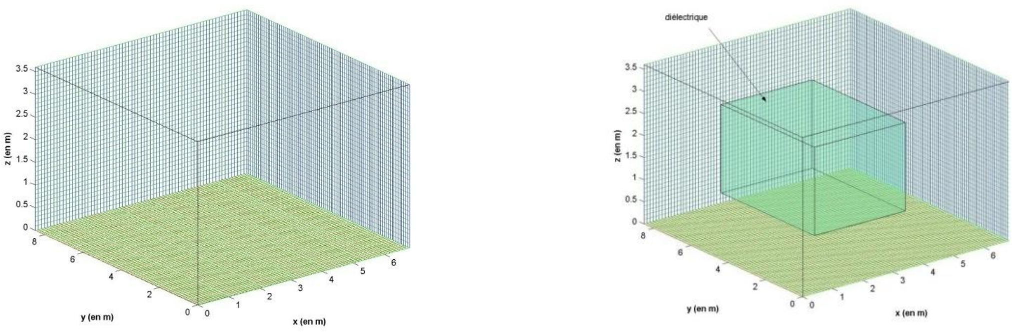
- 2°) Modifier le code afin de réaliser 400 itérations en temps. Quels sont les avantages de l'utilisation d'un code temporel ?
  Sauvegarder votre script sous tp02.m.

- 3°) Modifier les dimensions de la cavité afin de traiter le cas d'une cavité utilisable pour des essais CEM normatifs ; ici les dimensions seront : a=6.7m / b=8.4m / d=3.5m) avec un pas spatial delta constant dans toutes les directions : delta = 0.1 m.
  Sauvegarder votre script sous tp03.m.

- 4°) Sauvegarder les résultats (champ électrique E) dans un fichier (utiliser les fonctions MATLAB / Octave fprintf, save, dlmwrite au choix).
  Sauvegarder votre script sous tp04.m.

D. Code numérique : modélisations de cavités « vide » et « chargée »

Dans cette partie, on va retrouver numériquement les modes de résonance d'une cavité de type Chambre Réverbérante (CR) dans les cas 'vide' et 'chargé' (voir Figure 2).



(a) (b)

Figure 2. Cavités (chambres) réverbérantes vide (a) et chargée (b).

La charge est représentée par un volume pavé diélectrique :

- Position : xmin=1m ; ymin=1m ; zmin=1m / xmax=4m ; ymax=6m ; zmax=3m
- Propriétés diélectriques : ε_r = 3 dans toutes les directions

- 5°) Réaliser les modèles numériques de CRBM dans deux fichiers MATLAB distincts (FDTD_crbm_vide.m et FDTD_crbm_chargee.m) en aménageant le code FDTD.m précédent.
  Sauvegarder votre script sous tp05.m.

- 6°) Pour chacun des cas précédents, stocker les valeurs des champs Ex, Ey et Ez à chaque itération dans un fichier (respectivement result_vide.txt et result_chargee.txt) : le fichier comportera autant de lignes que d'itérations FDTD et 3 colonnes (pour Ex, Ey et Ez).
  Sauvegarder votre script sous tp06.m.

- 7°) Visualiser les résultats temporels obtenus à l'aide de MATLAB ('plot') en représentant le temps de la simulation en abscisse et les champs électriques en ordonnée.
  Sauvegarder votre script sous tp07.m.

- 8°) Utiliser le programme FFT_crbm.m afin de transposer vos résultats temporels en données fréquentielles (bien comprendre le fonctionnement du programme).
  Sauvegarder votre script sous tp08.m.

- 9°) Visualiser les résultats fréquentiels obtenus sur la bande de fréquence allant de 80MHz à 150MHz. Identifier les fréquences de résonance dans la gamme [80MHz, 150MHz].
  Les résultats sont-ils logiques ? Que peut-on en déduire sur l'influence du diélectrique dans la simulation ?
  Sauvegarder votre script sous tp09.m.

E. Compte-rendu

- **Dans le cadre de votre rapport, il vous est demandé de :**

  - Transcrire les différentes étapes réalisées ensemble en fournissant vos scripts (tp0*.m des questions précédentes ; penser à commenter vos scripts !).
  - Fournir vos scripts et un rapport au format PDF décrivant les éléments réalisés dans ces exercices avec votre vision personnelle.