

# Modélisation de la propagation électromagnétique

## Conférence invitée

Bernard Jecko  
François Torres

Bernard Jecko, docteur ès science 1979, professeur à l'Université de Limoges, dirige l'équipe "électromagnétisme" de l'IRCOM (Institut de recherche en communications optiques et micro-ondes) ainsi qu'un laboratoire CNRS-Université-Entreprise.

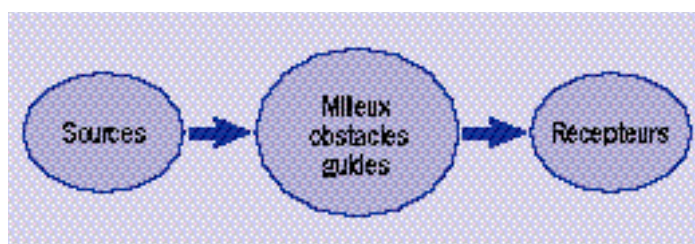
François Torres, docteur en électronique 1991, chargé de recherche au CNRS, responsable de l'activité CEM de l'équipe "électromagnétisme" de l'IRCOM, participe au développement des outils numériques de résolution en CEM.

# Modélisation de la propagation électromagnétique

Comme l'illustre cet article invité, la théorie et la simulation informatique se conjuguent pour évaluer la propagation des ondes électromagnétiques.

En télécommunications, l'information est véhiculée par une porteuse générée, propagée et réceptionnée par des dispositifs régis par les lois de l'électromagnétisme. En compatibilité électromagnétique, la transmission des parasites est soumise aux mêmes lois et il en est de même dans beaucoup d'autres domaines tels que l'optoélectronique, la surface équivalente radar, les applications en thermique et imagerie des micro-ondes, etc.

Dans tous ces domaines, le problème électromagnétique se pose toujours en termes de sources, de vecteurs de propagation, et de récepteurs de champ électromagnétique.



L'approche théorique de tous problèmes électromagnétiques est basée sur les équations de Maxwell :

$$\text{rot } \mathbf{e} = - \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \mathbf{h} = - \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} + \mathbf{j}$$

$$\text{div } \mathbf{d} = \rho$$

$$\text{div } \mathbf{b} = 0$$

où  $\mathbf{j}$  et  $\rho$  sont les sources des phénomènes électromagnétiques et  $\mathbf{e}(t)$ ,  $\mathbf{h}(t)$ ,  $\mathbf{b}(t)$ ,  $\mathbf{d}(t)$  des champs de vecteur caractérisant ces phénomènes.

La première difficulté est la recherche de modèles réalistes des trois entités (sources, vecteurs, récepteurs) compatibles avec les limitations liées aux outils déduits des équations de Maxwell et avec celles induites par le calcul numérique.

## Les outils électromagnétiques

La plupart des problèmes d'électromagnétisme peuvent se formuler en termes de diffraction d'une onde électromagnétique par un obstacle. Cette approche s'applique aussi bien aux phénomènes conduits que rayonnés, harmoniques que transitoires, en émission, en propagation ou en réception, ...dès que les fréquences mises en jeu dépassent quelques kilohertz.

Ainsi, le point clé dans la classification des méthodes d'analyse électromagnétique est le rapport entre les dimensions significatives des obstacles  $D_i$  et les longueurs d'ondes mises en jeu,  $\lambda_j$  :

- lorsque  $D_i \ll \lambda_j$ , les équations de Maxwell sont approximées par les méthodes statiques, quasi-statiques ou quasi TEM (transverse electromagnetic) ;

- lorsque  $D_i \gg \lambda_j$ , c'est le domaine des méthodes asymptotiques basées sur le principe de Fermat et la théorie des rayons ;

- lorsque  $D_i \approx \lambda_j$ , (zone de résonance des obstacles) aucune approximation des équations de Maxwell n'est possible. Les outils électro-magnétiques tiennent compte de tous les modes de propagation (c'est-à-dire de toutes les façons de se propager de l'onde électromagnétique). C'est le champ d'application des méthodes à formulation rigoureuse (full modes methods).

Dans la plupart des problèmes complexes, les trois cas cités précédemment se présentent simultanément. Dans ces conditions, soit la formulation sans approximation est utilisée seule au prix d'un coût numérique qui peut devenir prohibitif, soit les trois familles de méthodes sont associées et demandent alors un découpage topologique du volume d'étude (cf "Recherches en développement").

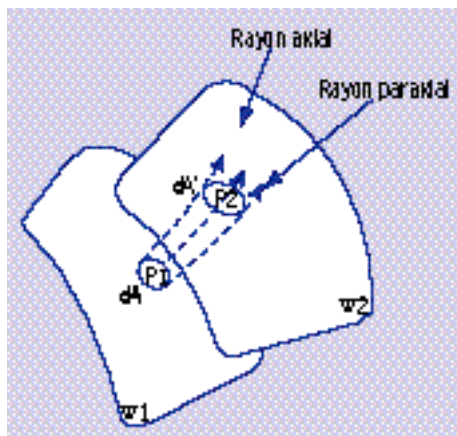
## Les méthodes quasi statiques

Elles sont surtout utilisées par les électriciens et électrotechniciens. Elles reposent sur le fait que dans l'équation

$$h = \frac{\partial d}{\partial t} + j. \text{ Le terme } \frac{\partial d}{\partial t} \text{ (courants}$$

de déplacement) est négligé devant les courants réels  $j$  correspondant à des variations temporelles lentes des phénomènes électromagnétiques et sont donc limitées à des problèmes très basse fréquence ( $< 1$  MHz). C'est donc essentiellement l'aspect quasi TEM (transverse electromagnetic) qui intéresse la propagation électromagnétique à travers la "théorie des lignes de transmission" ou ses dérivées. Il n'est nullement besoin de décrire cet outil, si utile aux ingénieurs, car il est abondamment analysé dans tous les ouvrages d'électromagnétisme. Seul persiste un flou sur les limitations de son application basées essentiellement sur l'apparition des modes supérieurs dans la ligne entraînant une condition sur le rapport  $D/\lambda$ , (où  $D$  est la distance entre les fils dans le cas d'une ligne bifilaire par exemple).

En fait, d'autres phénomènes, tel le rayonnement électromagnétique, peuvent mettre en défaut cette théorie à des fréquences inférieures à celles correspondant à l'apparition de modes supérieurs [1].



## Les méthodes asymptotiques

Elles sont basées sur une approximation des équations de Maxwell lorsque la fréquence tend vers l'infini ; en fait lorsque le rapport  $D/\lambda$  est suffisamment grand. Elles s'appuient en général sur la théorie de l'optique géométrique basée sur la notion de front d'onde et de rayon. Le front d'onde  $\psi(x, y, z)$  défini comme une surface équiphasse se déplace lorsque l'onde se propage. L'optique géométrique étudie l'évolution de ces surfaces et définit une correspondance ponctuelle entre elles. Cette correspondance est établie par des rayons normaux aux fronts d'onde ayant en chaque point la direction du flux d'énergie (figure 1).

L'écriture de la conservation du flux de puissance à travers le tube formé par les rayons permet d'obtenir l'équation de transport de puissance liant de façon ponctuelle chaque élément de la surface équiphasse  $\psi_1$  à un élément de la surface  $\psi_2$  :

$$|E_2| = \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + R)(\rho_2 + R)}} |E_1| \quad R = P_1 P_2$$

où  $E_2$  (resp  $E_1$ ) est champ électrique au point  $P_2$  (resp  $P_1$ ),  $\rho_1$  et  $\rho_2$  sont les rayons de courbure principaux des surfaces  $\psi_1$  et  $\psi_2$ .

Cette approche est complétée par le principe de Fermat déduit de la notion de chemin "optique". Le long d'un rayon dont la trajectoire est représentée par la courbe  $\Gamma$ , ce chemin est défini par l'intégrale curviligne :

$$\Delta\psi = \int_{\Gamma} n |d\mathbf{l}|$$

où  $n = \sqrt{\epsilon_r}$  est l'indice de réfraction du milieu diélectrique de constante  $\epsilon_r$  et de permittivité  $\mu_r = 1$ .

$ds$  est l'abscisse curviligne.

Fermat a émis le principe selon lequel, parmi l'infinité des trajets  $\Gamma$ , le rayon optique reliant une source à un point d'observation est tel que le chemin optique  $\Delta\psi$  soit stationnaire par rapport à toute modification infinitésimale de ce trajet. En d'autres termes, la différence entre le chemin optique suivi par un rayon et tout chemin optique voisin est un infiniment petit du deuxième ordre. Le trajet suivi par un rayon est donc un extrémum par rapport aux trajets voisins.

Ce principe très important peut être pris comme un postulat de l'optique géométrique. Il permet d'établir directement que, pour  $n = \text{cste}$ , les rayons suivent des trajectoires rectilignes, ou de retrouver facilement les lois de la réfraction et de la réflexion.

J. B. Keller [2] a prolongé cette approche "optique géométrique" en introduisant la diffraction et a créé la théorie géométrique de la diffraction (TGD ou GTD en anglais). Il suppose qu'aux hautes fréquences, le phénomène de diffraction devient un phénomène local ce qui facilite très bien l'introduction des rayons diffractés. Par la suite, Kouyoumjian et Pathak [3] vont éliminer quelques inconvénients (divergence au voisinage des frontières de l'optique géométrique) et étendre la théorie aux arêtes non rectilignes en créant l'UTD (uniform theory of diffraction). Plus récemment, Lee et Deschamps [4] ont proposé une alternative à la formulation de Kouyoumjian et Pathak en choisissant une autre approche du problème : l'UAT (uniform asymptotic theory).

[1] A. Reineix, B. Jecko

"Introduction of validating losses in the time domain transmission line method". Microwave and optical technology letters, vol. 2, n° 10, July 1994, pp 457-460.

[2] J. B. Keller

"Geometrical theory of diffraction". J. Opt. Soc. Amer., vol. 52, 1962.

[3] R. G. Kouyoumjian, P. H. Pathak

"A uniform geometrical theory of diffraction for edge in a perfectly conducting surface". Proc. IEEE, vol. 62, n° 11, November 1974, pp 1448-1461.

[4] S. W. Lee and G. A. Deschamps

"A uniform asymptotic theory of electromagnetic diffraction by a curved wedge". IEEE trans. antennas propagation, vol. AP-24, pp 25-34, 1976.

Figure 1

## Les méthodes à formulation rigoureuse

Elles sont utilisées lorsqu'aucune approximation sur les équations de Maxwell n'est possible. Il en existe une grande diversité liée aux modèles plus ou moins simplifiés des problèmes physiques établis pour rester compatible avec le traitement numérique. Seules seront présentées les techniques permettant de traiter des problèmes 3D, c'est-à-dire s'adressent à des structures, milieux, objets près de leur réalité physique. Deux familles d'approches électromagnétiques peuvent être identifiées :

- le traitement des problèmes en régime harmonique qui consiste à prendre la transformée de Fourier des équations de Maxwell, de traiter le problème fréquence par fréquence et de revenir si besoin dans le domaine temporel (procédure relativement lourde en électromagnétisme) ;
- le traitement des problèmes directement dans le domaine transitoire éventuellement suivi d'une transformation de Fourier si l'on veut des résultats en régime harmonique sur une large bande de fréquence.

La dualité des deux approches précédentes se conserve dans les développements électromagnétiques issus des équations de Maxwell aboutissant à une panoplie de méthode électromagnétique dont les principales sont présentées sur le tableau 1 :

- méthodes volumiques locales où les équations de Maxwell sont résolues localement dans un volume découpé en cellules (a) ;
- méthodes volumiques où est établie une forme variationnelle ou conservative sur tout le volume d'étude (b) ;
- méthodes de frontières (c) issues d'équations de propagation déduites des équations de Maxwell moyennant quelques limitations dans les applications liées à la difficulté d'obtenir les "fonctions de Green" du problème (solutions élémentaires). Cette technique présente l'important avantage de confiner le calcul à la surface des objets au prix d'une limitation de la généralité de ces objets ;
- méthodes spectrales qui consistent à prendre des transformées de Fourier spatiales des équations de propagation pour obtenir des problèmes algébriques ou des décompositions en ondes planes.

L'inconvénient majeur étant d'effectuer les transformées de Fourier inverse pour revenir dans le domaine réel (d) ;

- méthodes modales qui, comme précédemment, décomposent les équations suivant des bases maintenant liées à la géométrie des structures ce qui est assez limitatif quant à la généralité des objets à considérer.

## Aspect numérique

C'est l'aspect numérique et informatique qui donne très improprement son nom aux différentes méthodes électromagnétiques d'où un flou particulièrement dense entretenu par la plupart des marchands de logiciels. En fait, les opérateurs issus des traitements électromagnétiques peuvent être discrétisés par telle ou telle méthode numérique (différences finies, éléments finis, volumes finis, etc.). Ces techniques numériques sont en général des dérivées de la méthode des moments [5] associée à des méthodes d'interpolation.

Le principe de cette technique peut être décrit de la façon suivante :

– soit à résoudre dans un domaine D l'équation :  $L\{f\} = g$  où  $g$  est une fonction connue et  $f$  la fonction ou distribution linéaire à déterminer.  $L$  est un opérateur intégral, différentiel ou intégral-différentiel. Une base de fonction  $u$  est choisie dans le domaine D ou souvent dans un sous-domaine de D sur lesquelles les fonctions sont développées :

$$f = \sum a_k u_k \quad g = \sum b_k u_k$$

Un produit intérieur est défini dans D et appliqué à des fonctions test  $v_k$  :

$$\left\langle L \left( \sum a_k u_k \right), v_k \right\rangle = \left\langle \sum b_k u_k, v_k \right\rangle$$

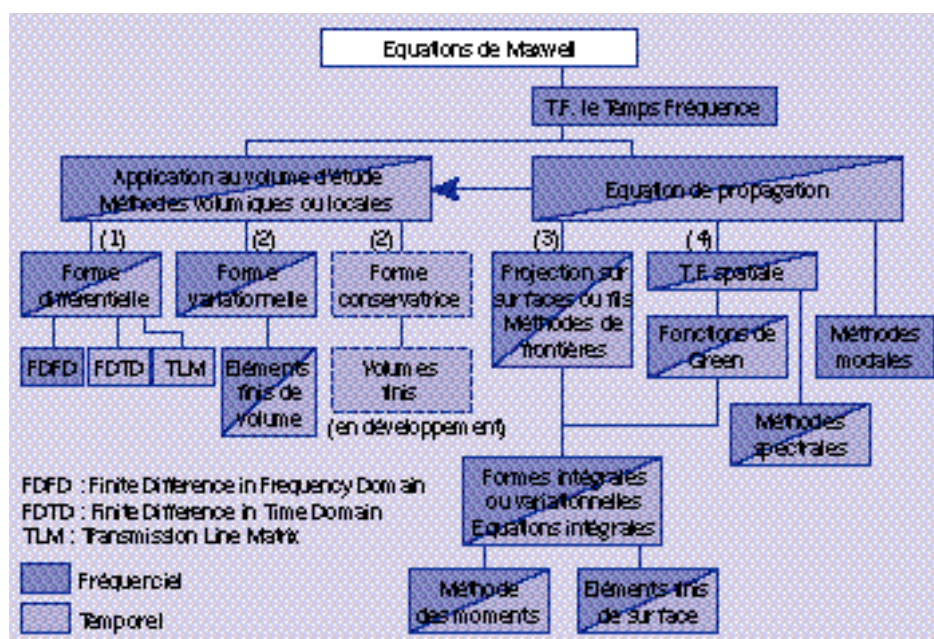


Tableau 1 - La résolution des équations de Maxwell : les différentes approches.

[5] R. F. Harrington  
"Field computation by moment method".  
The Mac Millan Company, New-York, 1968.

On obtient ainsi un système de  $n$  équations à  $n$  inconnues dont la résolution donne les coefficients  $a_k$ .

En harmonique, le problème conduit donc à l'inversion d'une matrice alors qu'en transitoire, la variable temps jouant un rôle particulier lié à l'application du principe de causalité, une méthode explicite est en général préférée à l'inversion matricielle. Elle conduit à construire la solution par incrémentation sur le temps à partir de  $t = 0$ . Les méthodes classiques telles les différences finies en transitoire n'apparaissent alors que comme des techniques particulières de cette méthode ( $L$  = opérateur de Maxwell, fonction base sont des portes et les fonctions test des Dirac).

## Limitations

Si nous rappelons que la première étape d'une étude théorique électromagnétique est le choix d'un modèle du problème à traiter compatible avec la capacité des méthodes électromagnétiques et numériques, nous voyons toute l'importance de la maîtrise des limitations des outils.

Traditionnellement, ces limitations sont décrites en terme de temps de calcul et de place mémoire mais ces critères sont peu significatifs étant donné la diversité des machines actuelles et leur évolution toujours fulgurante qui fait considérer un problème inaccessible il y a cinq ans comme trivial aujourd'hui. Avec les outils à formulation rigoureuse actuels, le maillage des structures est très couramment de l'ordre de  $(10 \lambda)^3$  avec une précision convenable (dimension de maille inférieure à  $\lambda/10$ , par contre  $(20 \lambda)^3$  pose encore un problème considérable. D'autres limitations résident dans la complexité des sources, des milieux, des récepteurs que l'outil électromagnétique peut traiter. Par exemple, les méthodes de frontière sont très bien adaptées au traitement des structures métalliques mais difficiles à mettre en œuvre pour les diélectriques homogènes et pratiquement impossible

|   | Méthodes volumiques |     |                   |                          | Méthodes de frontière    |                             |                          |
|---|---------------------|-----|-------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|   | Temporelles         |     |                   | Harmoniques              | Temporelles              | Harmoniques                 |                          |
|   | FDTD                | TLM | Volumes finis (*) | Eléments finis de volume | Equation intégrale + MOM | Equation intégrale + E.F.S. | Equation intégrale + MOM |
| <b>Milieux</b>  |                     |     |                   |                          |                          |                             |                          |
| Milieux parfaits  | +                   | +   | +                 | +                        | +                        | +                           | +                        |
| Milieux conducteurs à faible conductivité   | +                   | +   | +                 | +                        | =                        | +                           | +                        |
| Diélectriques à pertes par hystérésis   | +                   | —   | =                 | +                        | —                        | +                           | +                        |
| Milieux inhomogènes   | +                   | +   | +                 | +                        |                          |                             |                          |
| Milieux non-linéaires   | +                   | +   | +                 |                          | +                        |                             |                          |
| Espace libre  | +                   | =   | =                 | —                        | +                        | +                           | +                        |
| <b>Objets</b>   |                     |     |                   |                          |                          |                             |                          |
| Courbures quelconques   | =                   | =   | +                 | +                        | +                        | +                           | +                        |
| Surfaces  | +                   | +   | +                 | +                        | =                        | +                           | +                        |
| Structures filaires   | =                   | =   | =                 | —                        | +                        | +                           | +                        |
| Fentes minces   | +                   | —   | =                 | —                        | —                        | —                           | —                        |
| Lames minces  | =                   | —   | =                 | =                        | —                        | =                           | =                        |
| Circuits localisés  | +                   | +   | +                 | —                        | +                        | =                           | =                        |
| Jonction fils/surface   | +                   | =   | +                 | —                        | =                        | —                           | —                        |
| <b>Sources</b>  |                     |     |                   |                          |                          |                             |                          |
| Sources ponctuelles   | +                   | +   | +                 | =                        | +                        | —                           | —                        |
| Sources réparties   | +                   | +   | +                 | +                        | +                        | +                           | +                        |
| Illumination  | +                   | =   | +                 | —                        | +                        | +                           | +                        |
| Phénomène large bande   | +                   | +   | +                 | =                        | +                        | =                           | =                        |
| (*) en cours de développement.  |                     |     |                   |                          |                          |                             |                          |
| + : opérationnel      = : peu efficace      — : non opérationnel <div></div> : impossible |                     |     |                   |                          |                          |                             |                          |

Tableau 2 - Comparatif des performances (principales méthodes).

à utiliser pour les diélectriques inhomogènes. De même, certaines méthodes obligent à mailler les fils, fentes et lames minces (c'est-à-dire à considérer des objets comportant une dimension très inférieure ( $1/100$ ) à toute les dimensions des structures dont ils font partie) ce qui conduit à des calculs très lourds même en utilisant le maillage variable (éléments finis).

Le tableau 2 donne, à titre uniquement indicatif et ponctuel, un aperçu de la capacité des principales techniques électromagnétiques à traiter les problèmes complexes.



## Exemples d'application

### Propagation des ondes HF dans la ionosphère

L'objectif est d'analyser les phénomènes de propagation, de réflexion et de dépolarisation des ondes HF lorsqu'elles pénètrent dans la ionosphère. Sous l'effet du champ magnétique terrestre le milieu acquiert de nuit une permittivité tensorielle caractéristique d'un milieu anisotrope à pertes. Pour étudier un tel problème de propagation, le théoricien dispose actuellement, en parallèle avec les méthodes modales utilisées depuis longtemps [6], de méthodes volumiques à formulation rigoureuses (FDTD) adaptées aux milieux tensoriels à pertes qui permettent une variété d'applications beaucoup plus grande. Les éléments du tenseur de perméabilité sont donnés dans le tableau ci-contre.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & -j\varepsilon_{xy} & 0 \\ j\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\text{avec } \begin{cases} \varepsilon_{xx} = 1 - \frac{\omega_p^2 (\omega - j\nu)}{\omega [(\omega - j\nu)^2 - \omega_h^2]} \\ \varepsilon_{xy} = 1 - \frac{\omega_p^2 \omega_h}{\omega [(\omega - j\nu)^2 - \omega_h^2]} \\ \varepsilon_{zz} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega (\omega - j\nu)} \end{cases}$$

$$\nu(h) = 1.8 \cdot 10^{11} \exp(-h/6.9)$$

$$\omega_p = \frac{q_e^2}{\varepsilon_0 m_e} N_e$$

$$\omega_h = \frac{q_e^2}{m_e} \mu_e H_0 \quad H_0 // oz$$

### Antennes dans leur contexte

Dans le domaine de rayonnement électromagnétique, les méthodes actuelles permettent d'analyser le comportement en zone proche et lointaine des antennes en tenant compte de leur contexte

d'utilisation. L'exemple proposé pour illustrer cette capacité est l'étude du rayonnement d'une antenne fouet localisée sur un véhicule. La figure 2 montre que l'association de méthodes est une solution élégante pour traiter des problèmes coûteux en temps de calcul et en place mémoire.

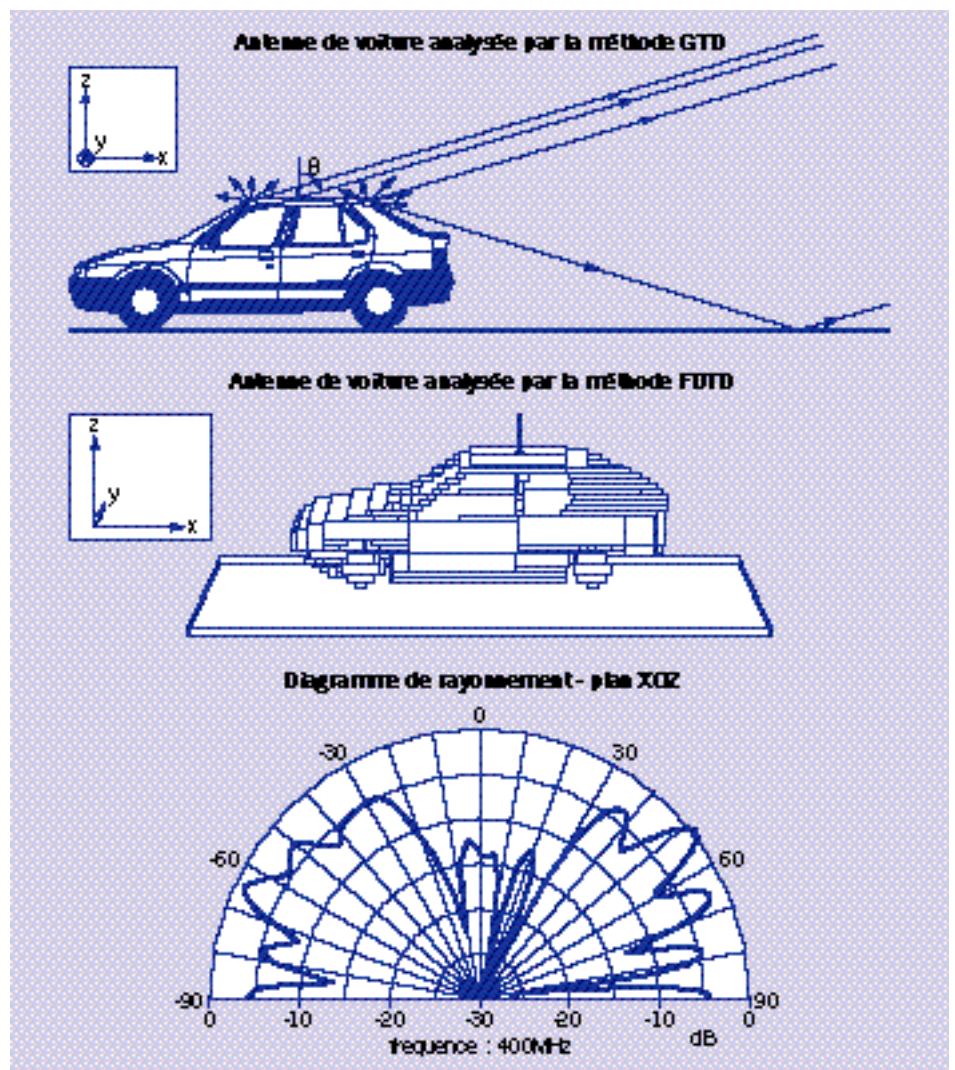


Figure 2 - Communications mobiles.

[6] F. J. Kelly  
"ELF/VLF/LF Propagation and system design".  
Naval research laboratory, Washington, Ionospheric  
effects branch space science division, NRL report  
9028, June 23, 1987, p 10.

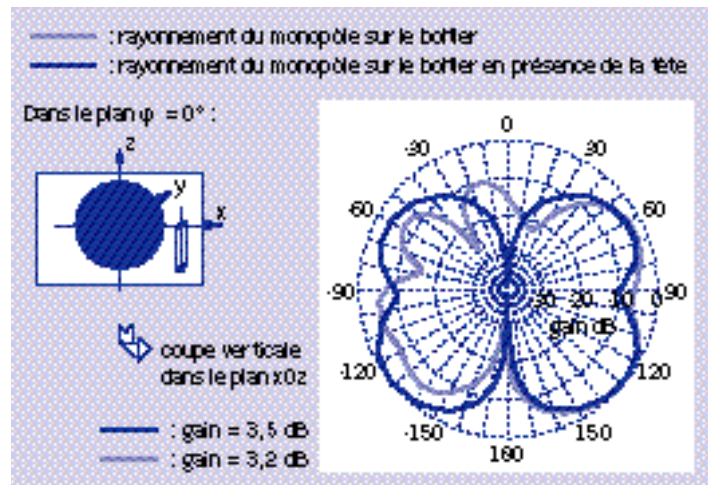
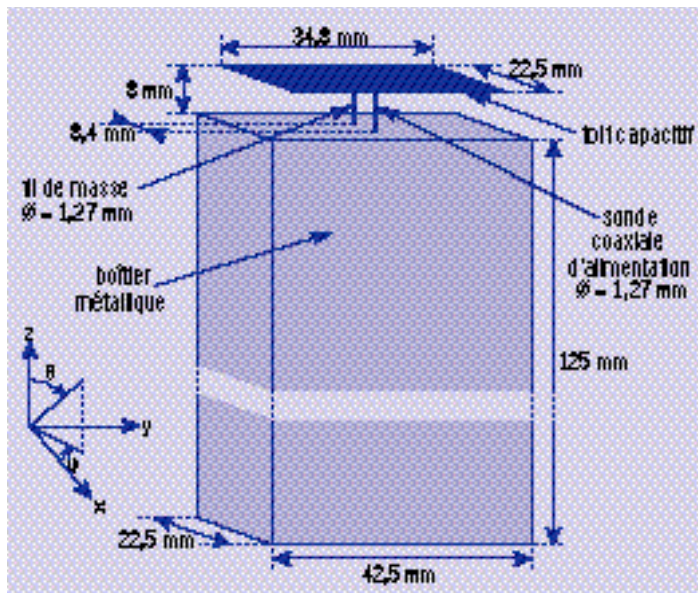


Figure 4 - Géométrie et dimensions de l'antenne sur le portable. ▲

▲ Figure 3 - Effet de la structure diélectrique sur le diagramme de rayonnement de l'antenne.

## Téléphone portable

Une illustration des applications micro-ondes centimétriques complexes est donnée par l'étude du comportement électromagnétique des téléphones portables (GSM, DEC, ...) pour lesquels l'approche théorique a une importance considérable. D'abord pour la conception d'antennes de petites dimensions (imprimées) à rayonnement monopolaire [figure 3], ensuite dans l'étude du rayonnement de telles antennes sur un boîtier de petites dimensions [figure 4], enfin dans l'étude du rayonnement de l'antenne en présence de la tête ou de la main et dans l'évaluation du SAR [7].

## Domaine millimétrique

En millimétrique, les approches théoriques ont un rôle très important à jouer dans la caractérisation des interconnexions dans les circuits (via, bounding, coudes, etc.). En effet, les outils de CAO actuels utilisent des bibliothèques de modèles souvent inadaptés à ces fréquences et qui demandent d'être caractérisés en tenant compte de tous les phénomènes électromagnétiques, en particulier du rayonnement et de la génération d'ondes de surface.

Le problème est d'autant plus crucial pour les interconnexions (MMIC-lignes, lignes-antennes, etc.) qui ne peuvent pour des raisons techniques être miniaturisés en proportion de la montée en fréquence.

A des fréquences encore plus élevées, c'est le concept même d'outils CAO électroniques tel qu'il est conçu

actuellement qui est discutable et devra sûrement être remplacé par des outils de CAO électromagnétiques capables de traiter des cartes entières.

Les outils électromagnétiques actuels permettent d'effectuer le bilan de puissance complet d'une structure. Par exemple, sur la figure 5, est présenté le comportement

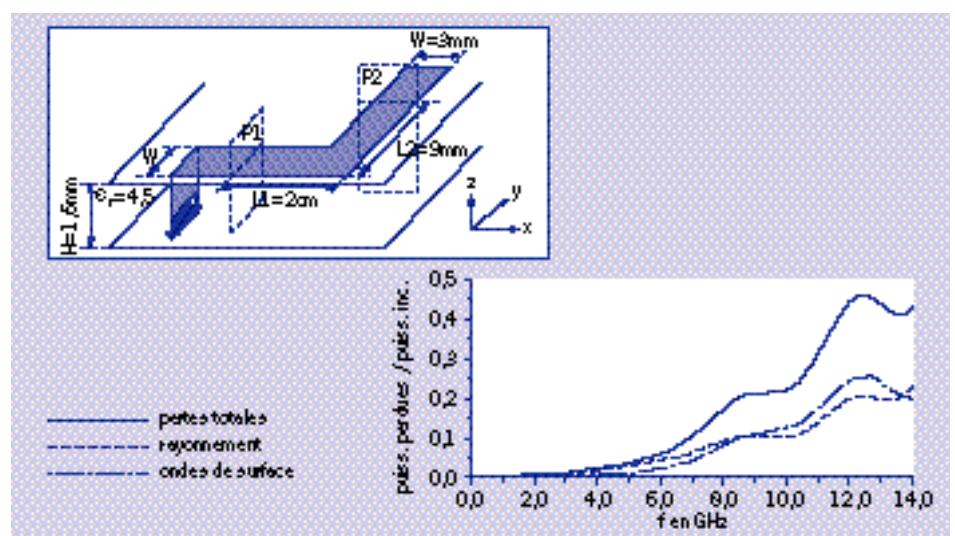


Figure 5 - Bilan de puissance pour un tronçon de ligne coudée sur verre époxy.

électromagnétique aux hautes fréquences d'un coude où l'on constate que la somme  $S_{11}^2 + S_{12}^2$  est très différente de l'unité. La dégradation du rendement correspond aux pertes par rayonnement et par ondes de surface dans le diélectrique. Mais le calcul électromagnétique montre un comportement encore plus surprenant puisqu'une partie de l'énergie électromagnétique ne passe plus par le coude entraînant des déphasages en fonction de la fréquence tout à fait évaluables par les techniques actuelles [8].

## Génération optoélectronique d'impulsions

Le dernier exemple d'application des outils électromagnétiques se situe dans le domaine de l'optoélectromagnétisme et concerne la génération optoélectronique d'impulsions électromagnétiques ultra-brèves par un photoconducteur illuminé par un laser femtoseconde. Les équations de Maxwell sont alors associées à d'autres équations de la physique pour analyser le comportement électromagnétique à l'intérieur d'un photoconducteur placé dans son contexte (électrodes) et prédire à partir des mobilités et des taux de recombinaison de porteurs les formes temporelles des impulsions générées.

Equations de Maxwell :

$$\mu \frac{\partial h(P, t)}{\partial t} + \text{rot } e(P, t) = 0$$

$$\varepsilon \frac{\partial e(P, t)}{\partial t} - \text{rot } h(P, t) = -J_n(P, t) - J_p(P, t)$$

Densités de courant :

$$J_n(P, t) = q \mu_n n(P, t) e(P, t) + q D_n \text{grad } n(P, t)$$

$$J_p(P, t) = q \mu_p p(P, t) e(P, t) - q D_p \text{grad } p(P, t)$$

Densités de porteurs :

$$\frac{\partial n(P, t)}{\partial t} = G(P, t) - R_n(P, t) + \frac{\text{div } J_n(P, t)}{q}$$

$$\frac{\partial p(P, t)}{\partial t} = G(P, t) - R_p(P, t) - \frac{\text{div } J_p(P, t)}{q}$$

–  $G(P, t)$  : taux de génération

–  $R$  : taux de recombinaison

– Constantes caractéristiques du matériau :

$\mu_n, \mu_p$  : mobilité

$D_n, D_p$  : constante de diffusion

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$$

Pour "lire" ces impulsions, des échantillonneurs optoélectroniques sont également conçus et optimisés à partir du calcul numérique (figure 6).

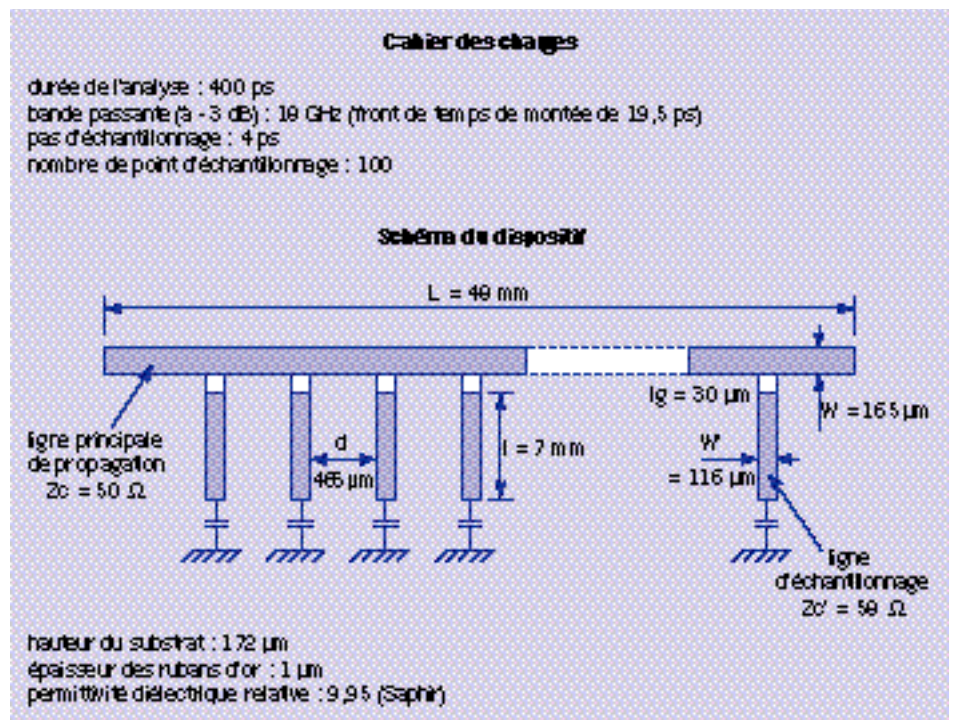


Figure 6 - Echantillonneur optoélectronique monocoup réalisé.

[8] V. Bertrand, M. Lalande, N. Feix, B. Jecko  
"Etude statique de structures planaires complexes. Application à la modélisation de l'excitation de lignes analysées par l'algorithme des différences finies transitoires".  
Annales des télécommunications, tome 49, n° 11-12, novembre-décembre 1994, pp 649-658.



## Recherche en développement

### Sur la modélisation des matériaux complexes

Si les matériaux homogènes, linéaires, isotropes ou anisotropes isolants, semi-conducteur ou conducteur, présentant des comportements régis par les lois de Debye ou Lorentz ou toute combinaison des deux commencent à être traitables aussi bien en fréquentiel qu'en temporel par les méthodes les plus performantes, il reste beaucoup de travail pour généraliser ces approches, à des matériaux complexes (multicouches, inhomogènes, etc.) dont le comportement électromagnétique n'est connu que par l'expérimentation dans une bande de fréquence limitée. Déterminer, pour ces matériaux, les lois suivant lesquelles ils se polarisent ou se magnétisent en présence du champ électromagnétique ; en déduire les caractéristiques des  $\epsilon$  et  $\mu$ , des impédances de surface, des coefficients de réflexion et de diffraction (pour les méthodes asymptotiques) est un challenge d'actualité particulièrement à cause du développement de la communication entre mobiles où une grande diversité d'objets est rencontrée.

Par contre, pour les milieux non linéaires, les formulations actuelles associées aux équations de Maxwell pour traduire le comportement des matériaux sont par trop simplistes et ne permettent pas de retrouver intégralement le comportement expérimental (ex. : solitons [9]).

Beaucoup d'autres applications, notamment en optoélectronique, nécessitent la modélisation de semi-conducteurs subissant des lois de variation de densité de porteurs qu'il est maintenant nécessaire d'être donnée la rapidité des phénomènes, d'associer avec les équations de Maxwell. De même, les milieux dont les caractéristiques varient avec la température (supraconducteurs, plasmas, milieux inflammables, etc.) nécessitent une association des équations de Maxwell avec d'autres équations de la physique.

Enfin, l'étude des effets électromagnétiques dans les matériaux "exotiques", photonic band gap [10], fractals [11], etc., n'en est qu'aux balbutiements.

### Sur l'évolution des méthodes numériques

Pour les méthodes à formulation rigoureuse, l'objectif est de permettre le traitement de structures de dimensions de plus en plus grandes tout en concevant des modèles qui "collent" le plus possible avec la surface des objets. D'où des recherches sur les techniques de discrétisation (ex : volumes finis [12]), sur les techniques de traitement informatique (parallélisation), sur l'analyse du comportement global d'objets canoniques (ex : fentes) enfin sur la modélisation de l'espace ouvert où les récents travaux de Béranger [13] ont permis aux méthodes volumiques de franchir un cap très significatif.

### Approche topologique

Mais le point fort des recherches actuelles dans le domaine de la modélisation électromagnétique est le couplage de méthodes associant méthodes à formulation rigoureuse, méthodes asymptotiques et quasi statiques pour traiter des problèmes électromagnétiques présentant des objets de dimensions disparates et des distances de propagation importantes entre ces objets. Sur le plan harmonique, cette approche se traduit par l'élaboration de méthodes hybrides très difficiles à concevoir étant donné le contexte non local des opérateurs. En transitoire, cette technique s'appuie sur le principe d'Huygens mais demande le développement des méthodes asymptotiques en transitoire qui est en cours actuellement.

Parallèlement à toutes ces passerelles qui se mettent en place pour associer efficacement toutes les méthodes, se développent des outils topologiques permettant une découpe systématique de l'espace d'étude en volumes topologiques.

Dans chacun de ces volumes, la méthode d'analyse électromagnétique la plus appropriée est utilisée, enfin, sur les surfaces constituant les interfaces entre volumes des lois spécifiques sont élaborées pour assurer la continuité des phénomènes électromagnétiques.

Par exemple, pour analyser le couplage parasite entre deux antennes d'un porte-avions trois volumes topologiques peuvent être définis ; dans le premier, les équations filaires sont utilisées, dans le deuxième, une méthode asymptotique sera développée enfin, dans le troisième, le plus complexe (îlot), une méthode volumique à formulation rigoureuse sera proposée figure 7. De même, l'étude de la pénétration à l'intérieur du bâtiment procèdera de la même technique. La figure montre un exemple de découpage topologique du porte-avions.

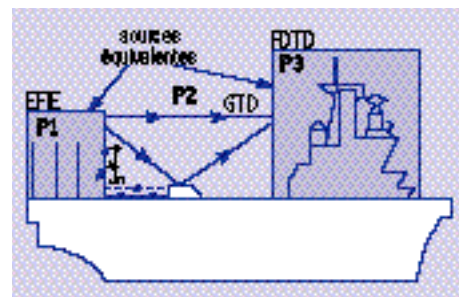


Figure 7 - Exemple de découpage topologique.

- [9] A. Reineix, M. Ariaudo, B. Jecko, A. Barthelemy, C. Froehly  
"Adaptation of the FDTD method to the study of femtosecond electromagnetic soliton". Microwave and optical technology letters, vol. 7, n° 11, 5 August 1994, pp 507-511.
- [10] E. Yablonovitch  
"Photonic band gap structures". Journal of optic, Soc. Ann. B., vol. 10, n° 2, Feb. 1993, pp 283-295.
- [11] A. Le Mehaute  
"Les géométries fractales". Hermès, 1990 - Série images.
- [12] V. Shankar, A. H. Mohammadian and W. F. Wall  
"A time-domain, finite-volume treatment for the Maxwell equations". Hemisphere publishing corporation "Electromagnetics" 10.127-145, 1990.
- [13] J. P. Berenger  
"A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves". Journal of computational physics, vol. 114, n° 2, Oct. 1994, pp 185-200.

L'étude de la pénétration des ondes électromagnétiques dans les bâtiments procède de la même technique détaillée dans la figure 8a par la définition de volumes topologiques. L'algorithme d'étude est ensuite régi par le graphe d'interaction de la figure 8b.

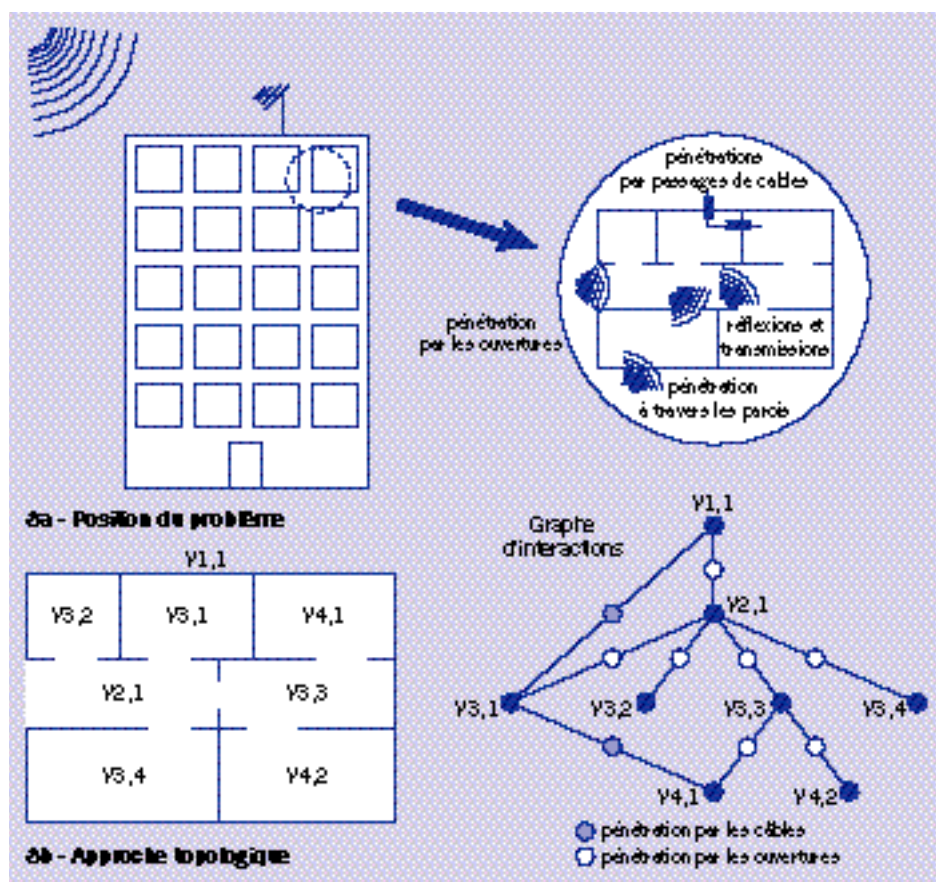


Figure 8 - Pénétration des ondes à l'intérieur des bâtiments.

## Conclusion

L'objectif essentiel de cet exposé étant de montrer que la modélisation électromagnétique est sortie de l'application aux "cas d'école" et permet désormais de traiter des problèmes concrets et complexes où seule l'expérimentation était envisageable sans apporter dans beaucoup de cas une maîtrise des phénomènes.

En fait, s'il est une discipline où la théorie et l'expérimentation sont indissociables, c'est bien l'électromagnétisme. En effet, les phénomènes sont complexes, difficiles voire impossibles à reproduire et demandent un nombre important de configurations d'étude. Les deux approches théorique et expérimentale sont alors complémentaires, l'une complique le phénomène à reproduire par la présence du système d'acquisition, ... l'autre le simplifie par l'utilisation de modèles ; l'une travaille sur un phénomène réel mais ne peut aborder que quelques cas de figure, l'autre peut traiter un nombre important de cas.

Il est donc indispensable de continuer l'effort entrepris dans ce domaine non seulement par la recherche de nouvelles techniques électromagnétiques et numériques mais surtout en focalisant notre énergie dans la conception de logiciels robustes, ouvrant un large champ d'application. Mais le retard le plus important à combler pour disposer d'outils efficaces se situe dans le domaine de la convivialisation des logiciels et dans une moindre mesure dans celui de la portabilité.