

# Méthodes Hybrides

---

Chacunes des méthodes mentionnées précédemment est adaptée à la modélisation d'un type de problème. Certaines sont plutôt dédiées à l'étude de dispositifs électriquement petits (méthodes rigoureuses) tandis que d'autres sont plutôt dédiées à l'étude de dispositifs électriquement grands (méthodes asymptotiques). Il serait intéressant d'élargir le domaine d'application de ces méthodes afin de modéliser l'ensemble du canal de propagation, d'une source vers un récepteur, dans un environnement réel constitué de nombreux objets de dimensions variées.

De nombreuses techniques d'optimisation et d'accélération ont été développées pour réduire l'espace mémoire et le coût de calcul des méthodes de modélisation [SC95]. Malgré ces efforts, aucune méthode ne peut prétendre modéliser l'ensemble du canal de propagation. Une solution consiste alors à coupler certaines d'entre-elles, chacune travaillant sur son domaine de prédilection. On appelle ces méthodes, des méthodes hybrides.

La modélisation de problèmes multi-échelles — objets de petites et grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde — nécessite de coupler différentes méthodes entre-elles. Le principe du couplage consiste à réduire le problème initial en le décomposant en plusieurs sous-domaines, sur chacun desquels on applique une méthode de résolution appropriée. On parle aussi de calcul collaboratif, chaque méthode de résolution traite son domaine particulier. Ceci nécessite la création d'interfaces entre les méthodes ainsi couplées pour assurer la continuité entre les sous-domaines.

Il existe principalement trois types de couplage :

- des couplages entre méthodes rigoureuses.
- des couplages entre méthodes asymptotiques.
- des couplages entre méthodes rigoureuses et asymptotiques.

Notons que la plupart des méthodes utilisées possèdent une formulation dans les domaines temporel et fréquentiel. Ceci n'empêche en rien le couplage de méthodes dont les domaines d'analyse sont différents. Une transformée de Fourier permettra de passer d'un domaine à l'autre afin que chacune des méthodes ainsi couplées travaille sur son domaine. La difficulté de coupler des méthodes temporelles réside dans la stabilité de celles-ci.

Il existe une multitude de méthodes hybrides. Nous n'en donnerons ici que quelques exemples, la liste étant loin d'être exhaustive.

## 4.1 Couplages des méthodes rigoureuses

De nombreux couplages ont été développés à partir des méthodes rigoureuses pour l'analyse de la CEM entre dispositifs hyperfréquences ou l'étude du rayonnement d'une antenne en espace libre.

Parmi les méthodes rigoureuses, certaines sont basées sur les champs électromagnétiques (méthodes volumiques) tandis que d'autres sont basées sur les courants (équations intégrales). Le couplage entre ces différentes méthodes permet l'analyse de problèmes multi-échelles. En effet, à partir des courants on peut obtenir l'expression du champ rayonné dans tout l'espace, ce qui n'est pas envisageable avec les méthodes volumiques basées sur les champs, et qui nécessitent d'échantillonner tout l'espace d'analyse. De plus, leurs capacités à modéliser des objets complexes — de forme géométrique quelconque — en font des méthodes privilégiées pour l'analyse de dispositifs dont les formes sont complexes. Aussi elles permettent l'analyse du couplage électromagnétique entre des objets proches ou l'analyse du rayonnement d'un dispositif dans un milieu inhomogène.

Une autre solution consiste à définir des surfaces fictives autour d'un objet pour en chercher les courants de surface. Typiquement, chaque objet est placé à l'intérieur d'un volume de calcul (TLM, FDTD par exemple) et entouré d'une surface fictive dont on cherche à déterminer les courants de surface. On utilise souvent la technique *Marching-on-in-Time* pour déterminer ces courants [MMR97], [MW05]. Le champ tangentiel de chaque surface fictive provient du champ électromagnétique du volume de calcul propre de l'objet et du champ rayonné par l'ensemble des objets, y compris lui-même. Ceci permet ainsi de calculer le champ électromagnétique en tout point de l'espace.

Parmi ces couplages, on peut citer celui d'une méthode volumique telle que la méthode TLM avec les équations intégrales (TLM-IE) qui est très bien adapté à la modélisation des interactions électromagnétiques entre des objets complexes séparés par une grande distance (grande région d'espace libre) [LPR99]. Les objets (volumiques) sont modélisés par la TLM tandis que les éléments de surface des sous régions (surfaces des objets) sont couplées avec la méthode des équations intégrales *via* des fonctions de Green dans le domaine temporel.

Aussi, ce couplage a permis l'étude par exemple du rayonnement d'une ligne micro-ruban en zone de champ proche et en zone de champ lointain [PLR98].

On peut également citer le couplage entre la TLM-IE et la TD-MoM<sup>1</sup> pour l'analyse de structures rayonnantes dans des environnements de propagation en présence d'obstacles et plus particulièrement pour étudier le couplage en zone de champ proche d'une antenne patch avec des objets métalliques [KR07].

On trouve d'autres types de couplage entre la TLM et la FDTD ou entre la FDTD et la MoM pour la résolution de problèmes de CEM [EH96], [PLR99]. Ou bien encore entre la TLM et la MoM pour étudier les interférences entre antennes [NMBS08].

On peut aussi utiliser la MoM pour modéliser la condition d'espace ouvert d'une structure rayonnante (pas d'échantillonnage nécessaire du volume) et la FEM pour modéliser un

---

1. Time Domain - Method of Moments.

milieu inhomogène (corps/objets diélectriques) en termes de distribution des champs à l'intérieur d'un volume.

Citons également un couplage entre la méthode spectrale et la FDTD pour l'analyse de milieux anisotropes, inhomogènes et périodiques [CGS93].

Ce type de couplage permet aussi le traitement de problèmes multi-physique en choisissant par exemple une méthode pour traiter des aspects électromagnétiques et une autre pour les aspects thermiques [Tri08].

## 4.2 Couplages des méthodes asymptotiques

Nous avons vu au chapitre précédent une technique de lancer hybride : le lancer de faisceaux adaptatifs *cf.* Section 3.3.3 p. 45. Ce n'est pas à proprement parler un couplage entre méthodes mais bien une méthode particulière. On la nomme hybride car elle allie certaines caractéristiques des méthodes de lancer de rayons et de lancer de faisceaux.

Des techniques de couplages entre méthodes asymptotiques existent et notamment entre les méthodes basées sur les champs électromagnétiques et celles basées sur les courants.

Une d'elle utilise le lancer de rayons avec la PO/PTD pour déterminer la SER<sup>2</sup> d'une cible [Wei06]. L'idée est de combiner l'algorithme du lancer de rayons avec les principes de la PO et de la PTD. La technique consiste à décomposer la surface de l'objet « cible » par un grand nombre de rayons et d'utiliser la PO/PTD pour calculer le courant à la surface de l'objet ainsi échantillonné. L'intégrale de surface de la PO/PTD se réduit alors comme la somme des contributions des rayons sur chaque élément de surface.

Une autre méthode utilisant les principes de la diffraction optique et physique, c'est-à-dire UTD et PO, a été développée pour tenir compte des diffractions multiples d'une onde sphérique sur une série d'obstacles parfaitement conducteurs [RMGPJL09]. Ces obstacles peuvent avoir différentes formes canoniques tels que des coins, des arêtes ou des cylindres. Cette formulation n'a pas besoin de tenir compte des termes de diffraction de plus haut degré (*slope-diffraction*) qui assurent la continuité et améliore la précision entre les zones d'ombre de l'UTD. En effet, l'utilisation de l'UTD est limitée dans les zones de transition. On évalue seulement la diffraction simple à laquelle s'ajoute la formulation de la PO pour les multiples diffractions.

On peut également citer un couplage entre la GO et la PO/PTD pour déterminer la SER d'une cible radar [VW09].

Cependant, ces approches sont limitées à l'étude en champ lointain (hypothèse haute fréquence) d'objets relativement simples.

## 4.3 Couplages des méthodes rigoureuses/asymptotiques

L'hybridation des méthodes numériques et asymptotiques suscite un grand intérêt dans un compromis entre précision et temps de calcul.

---

2. Surface Équivalente Radar, en anglais *RCS* pour *Radar Cross Section*.

Les méthodes rigoureuses étant plutôt dédiées à l'étude d'objets électriquement petits et les méthodes asymptotiques aux objets électriquement grands, il semble donc très intéressant de coupler ces méthodes entre-elles afin d'étudier des problèmes multi-échelles de rayonnement, de diffraction et de couplage d'antennes sur des structures de grandes dimensions.

Deux types de problèmes électromagnétiques se posent dans ce genre de couplage. On cherche généralement à étudier les interactions d'une source avec un objet de grande ou de petite dimension.

Dans le premier cas, le problème consiste à modéliser la source par une méthode rigoureuse appropriée et à étudier l'interaction avec un objet de grande dimension par une méthode asymptotique. D'une manière générale, l'utilisation de méthodes rigoureuses dans ce cas consiste à déterminer les courants pour appliquer ensuite une méthode physique telle que la PO ou la PTD par exemple.

*A contrario*, dans le second cas, la source est modélisée à l'aide d'une méthode asymptotique (typiquement lancer de rayons) et l'objet de petite dimension avec une méthode rigoureuse.

Dans ces deux cas, la source et l'objet doivent être placés relativement loin l'un de l'autre, ce qui exclut ou du moins rend difficile l'étude du couplage entre eux. Ceci nécessite que l'objet considéré doive être de dimension comparable à la longueur d'onde, auquel cas, le volume de calcul deviendrait beaucoup trop important. De plus, la source doit se trouver en zone de Fraunhofer (zone de champ lointain). En effet, plus la source est éloignée et plus l'effet de couplage diminue.

La FDTD est une des méthodes le plus souvent utilisée pour réaliser des couplages de méthodes électromagnétiques, comme la FDTD et l'UTD [BEJ96], [Bea02a] par exemple. Un problème typique est l'analyse en zone de champ lointain du champ électromagnétique rayonné par une antenne placée à proximité d'un réflecteur (plan fini).

On peut citer également le couplage entre la méthode TLM et la TD-PO<sup>3</sup> pour obtenir le diagramme de rayonnement d'une antenne proche d'un réflecteur [Lan08]. La TLM respectivement la TD-PO sont utilisées pour modéliser les objets complexes de petites dimensions respectivement les structures électriquement grandes.

Ce type de problème du couplage entre des antennes et de larges structures métalliques peut aussi être étudié par le couplage entre la FEM et l'UTD [HPB00].

Ou bien encore la MoM-GTD pour étudier le couplage d'une antenne proche d'un objet conducteur de grande dimension tel que les antennes sur des porteurs par exemple [TN75], [DT84]. La MoM est utilisée pour modéliser l'antenne tandis que la GTD est utilisée pour analyser le rayonnement électromagnétique de l'objet dans l'espace.

La MoM-UTD peut être utilisée pour l'étude du couplage entre les ouvertures d'antennes cylindriques [PJ01]. Le calcul des champs à l'intérieur de l'ouverture est effectué par la MoM et l'UTD est utilisée pour déterminer les champs rayonnés d'une ouverture à l'autre.

On trouve aussi un couplage entre la FDTD et la PO [Boz98] pour l'étude du champ électromagnétique rayonné par des structures de dimensions différentes. Ce couplage donne des résultats d'autant plus corrects que l'on se situe loin de l'objet réflecteur,

---

3. Time Domain - Physical Optic.

et où le phénomène de réflexion devient prépondérant devant le phénomène de diffraction car l'optique physique ne tient pas compte de la diffraction.

Aussi, on peut citer la FDTD couplée au lancer de rayons [Bea02b] [WSNC00]. Le lancer de rayons est utilisé pour les zones d'espace libre et la FDTD pour analyser les objets complexes (comportant des discontinuités) où les solutions basées sur le lancer de rayons ne sont pas suffisamment précises. Ce sont typiquement des situations de propagation *in-door* ou de rayonnement d'une antenne en espace libre. Dans le même type de problème, on trouve aussi du couplage entre la FEM et la PO-PTD [Din04].

D'autres méthodes encore telles que la MoM-PO [JL95] pour tenir compte d'un coin parfaitement conducteur ou l'UTD-FDTD [RMP99] pour étudier le rayonnement d'une structure cylindrique.

Le simulateur Feko<sup>TM</sup> utilise aussi la MoM-UTD, la MoM-GO ou la MoM-PO pour traiter de problèmes électromagnétiques divers.

Généralement les méthodes hybrides couplent deux méthodes. D'autres, dites « multi-hybrides » mettent en œuvre un couplage entre trois voire quatre méthodes pour certaines. Ceci dit la mise au point de tels couplages de méthodes peut devenir relativement complexe, c'est pourquoi souvent les couplages se limitent à deux méthodes.

Parmi ces méthodes multi-hybrides, on peut mentionner un couplage entre la FDTD, la TD-MoM<sup>4</sup> et la TD-FEM<sup>5</sup> [Mea04]. Aussi entre la FDTD, la TD-MoM et la GTD [BH05] ou bien encore entre la FEM, la PO/PTD et l'UTD [FRGCGRSP07].

L'ensemble de ces méthodes n'est qu'un aperçu des techniques de couplage existantes, la liste étant loin d'être exhaustive. La plupart des méthodes mentionnées ont été développées dans les domaines temporel et fréquentiel et on trouve des couplages entre la plupart d'entre-elles. En effet elles permettent chacune de couvrir avec une certaine précision (fonction des hypothèses de départ) un certain domaine d'analyse.

---

4. Time Domain - Method of Moment.

5. Time Domain - Finite Element Method.



# Conclusion de la partie I

Actuellement, la plupart des simulateurs électromagnétiques se basent sur une résolution des équations de Maxwell sous forme intégrale, différentielle ou par des approximations hautes fréquences de ces équations.

Un grand nombre de méthodes a été développé pour résoudre des problèmes électromagnétiques, certaines dites « rigoureuses » sont plutôt dédiées à l'analyse de dispositifs électriquement petits, et d'autres dites « asymptotiques » sont plutôt dédiées à l'analyse de dispositifs électriquement grands.

Les limitations de ces méthodes de modélisation des phénomènes électromagnétiques — en termes de complexité et de dimension des systèmes à modéliser — incitent à chercher et à développer de nouvelles techniques. Une solution consiste à coupler certaines de ces méthodes entre-elles afin de bénéficier des performances de chacune dans leur domaine de prédilection, ce sont les méthodes hybrides. Le problème initial est décomposé sur des sous-domaines sur lesquels on applique une méthode de résolution appropriée. Cependant, leurs limitations propres sont également une contrainte à leur développement. Malgré les apports faits à ces différentes méthodes pour simplifier les calculs électromagnétiques, la dimension et la complexité des problèmes à traiter nécessitent un saut méthodologique important. Ceci dans le but de répondre au mieux à ces exigences, en développant une méthode et un outil capables de tenir compte à la fois de la complexité des systèmes à modéliser et d'autre part de leur intégration dans un environnement réel de grande dimension.

Les méthodes de modélisation des systèmes complexes et leur approche multi-agents peuvent répondre à cette problématique.

Nous allons voir dans la seconde partie comment ces méthodes peuvent répondre à notre problématique et sur quels concepts elles se basent pour construire un modèle d'un environnement électromagnétique.



# Références de la partie I

- [Bal89] C. A. Balanis. *Advanced Engineering Electromagnetics*. Wiley, 1989.
- [Bea02a] P. Bernardi and et al. A UTD / FDTD Investigation on Procedures to Assess Compliance of Cellular Base-Station Antennas with Human-Exposure Limits in a Realistic Urban Environment. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 51 , 2002.
- [Bea02b] P. Bernardi and et al. Ray-Tracing / FDTD : A Comparison on their Applicability for Human Exposure Evaluation. *International Journal of Numerical Modelling*, vol. 5 , 2002.
- [BEJ96] B. Beillard, K. Etriou, and B. Jecko. Coupling of Methods : Finite Difference Time Domain and Asymptotic Methods. *Electronics Letters*, vol. 35 (4) : pp. 308–309, February 1996.
- [Bér94] J. P. Bérenger. A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves. *J. Comp. Phys.*, vol. 114 (2) : pp. 110–117, October 1994.
- [BH05] A. Becker and V. Hansen. Hybrid : Combining the Time-Domain Method of Moments, the Time-Domain Geometrical Theory of Diffraction and the FDTD. *Journal IEE*, vol. 2A : pp. 94–97, July 2005.
- [BK94] V. A. Borovikov and B. Ye. Kinber. *Geometrical Theory of Diffraction*, volume 37 of *Electromagnetic Waves Series*. IEE, 1994.
- [BM94] D. Bouche and F. Molinet. *Méthodes Asymptotiques en Électromagnétisme*, volume 16 of *Mathématiques & Applications*. Springer-Verlag, 1994.
- [Bon95] M. Bonnet. *Équations Intégrales et Éléments de Frontières : Applications en Mécaniques des Solides et des Fluides*. CNRS Editions, 1995.
- [Boz98] F. Le Bozer. *Hybridation de la Technique des Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD) et de l'Optique Physique dans le Domaine Temporel (TDPO). Applications aux Antennes Microruban en Cavité*. PhD thesis, Université de Rennes, Février 1998.
- [CBRM84] A. Clarkowski, J. Boersma, and R. R. Mittra. *Plane-Wave Diffraction by a Wedge – A Spectral Domain Approach*. Ibid, 1984.
- [CGS93] A. C. Cangellaris, M. Gribbons, and G. Sohos. A Hybrid Spectral / FDTD Method for the Electromagnetic Analysis of Guided Waves in Periodic Structures. *IEEE Microwaves and Guided Wave Letters*, vol. 3 (10) : pp. 375–177, October 1993.

## Références I

---

- [Cle66] P. C. Clemmow. *The Plane Wave Spectrum Representation of Electromagnetic Fields*. Pergamon Press, 1966.
- [Cle73] P. C. Clemmow. *A Introduction to Electromagnetic Theory*. Cambridge University Press, 1973.
- [Con05] E. Conil. *Propagation Électromagnétique en Milieu Complexe – du Champ Proche au Champ Lointain*. PhD thesis, INP Grenoble, 2005.
- [CS00] M. V. K. Chari and S. J. Salon. *Numerical Methods in Electromagnetism*. Academic Press, 2000.
- [Des72] G. A. Deschamps. Ray Techniques in Electromagnetics. *Proceedings of the IEEE*, vol. 60 : pp. 1022–1035, September 1972.
- [Din04] W. P. Ding. FEM / PO-PTD for Evaluation of Scattering by Complex Objects. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1 : pp. 363–366, June 2004.
- [DT84] S. A. Davidson and G. A. Thiele. A Hybrid Method of Moment – GTD Techniques for Computing Electromagnetic Coupling Between Two Monopole Antennas on a Large Cylindrical Surface. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. EMC-26 (2) : pp. 90–97, May 1984.
- [ECHA08] D. Erricolo, S. M. Canta, H. T. Hayvacı, and M. Albani. Experimental and Theoretical Validation for the Incremental Theory of Diffraction. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 56 (8), August 2008.
- [EH96] C. Eswarappa and W. J. R. Hofer. A Hybrid 3D TLM-FDTD Model of Microwave Fields. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 2 : pp. 1063–1066, 1996.
- [ESRV02] H. M. El-Sallabi, I. T. Rekanos, and P. Vainikainen. A New Heuristic Diffraction Coefficient for Lossy Dielectric Wedges at Normal Incidence. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 1 , 2002.
- [FRGCGRSP07] R. Fernández-Recio, L. E. García-Castillo, I. Gómez-Revuelto, and M. Salazar-Palma. Fully Coupled Multi-Hybrid FEM-PO / PTD-UTD Method for the Analysis of Radiation Problems. *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 43 (4) : pp. 1341–1344, April 2007.
- [Gar96] F. Gardiol. *Traité d'Électricité – Électromagnétisme*, volume 3. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1996.
- [GF63] I. M. Gelfand and S. V. Formin. *Calculus of Variations*. Prentice Hall, 1963.
- [Gla89] A. S. Glassner. *An Introduction to Ray Tracing*. Academic Press, 1989.
- [Gui83] J. L. Guiraud. *Annals of Telecommunications*, volume 38. Springer, 1983.
- [Han85] R. H. Hansen. The Spectral-Domain Approach for Microwave Integrated Circuits. *IEEE Trans. MTT*, vol. MTT-33 (10) : pp. 1043–1056, October 1985.
- [Har93] R. F. Harrington. *Field Computation by Moment Methods*. IEEE Press Series on Electromagnetic Waves, 1993.

- [Hey02] E. Heyman. *Scattering : Scattering and Inverse Scattering in Pure and Applied Science*, volume vol. 1 , chapter 1.5.4 Pulsed beam solution for propagation and scattering problems, pages pp. 295–315. Academic Press, R. Pike and P. Sabatier, 2002.
- [Hil07] J. Hillairet. *Application du Formalisme des Faisceaux Gaussiens à la Modélisation de l'Interaction d'une Onde Électromagnétique avec un Objet 3D Complexe*. PhD thesis, Université de Toulouse III, 2007.
- [Hoe87] W. J. R. Hofer. The Transmission Line Matrix Method – Theory and Applications. *IEEE Trans. MTT*, vol. MTT-33 (4) : pp. 370–377, April 1987.
- [Hol00] P. D. Holm. A New Heuristic UTD Diffraction Coefficient for Nonperfectly Conducting Wedges. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 48 (8), August 2000.
- [HPB00] D. H. Han, A. C. Polycarpou, and C. A. Balanis. FEM-Based Hybrid Methods for the Analysis of Antennas on Electrically Large Structures. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 2000.
- [Jam86] G. L. James. *Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves*, volume 1 of *Electromagnetic Waves Series*. Peter Peregrinus – IEE, third edition, 1986.
- [JB85] P. B. Johns and R. L. Beurle. Numerical Solution of 2-Dimensional Scattering Problems Using Transmission-Line Matrix. *IEEE Trans. MTT*, vol. MTT-33 (10) : pp. 882–893, October 1985.
- [JH03] D. G. Swanson Jr. and W. J. R. Hofer. *Microwave Circuit Modeling Using Electromagnetic Field Simulation*. Artech House, 2003.
- [JL95] U. Jakobus and F. M. Landstorfer. Improvement of the PO-MoM Hybrid Method by Accounting for Effects of Perfectly Conducting Wedges. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 43 (10) : pp. 1123–1129, October 1995.
- [Kel62] J. B. Keller. Geometrical Theory of Diffraction. *Journal of the Optical Society of America*, vol. 52 (2), February 1962.
- [KP74] R.G. Kouyoumjian and P.H. Pathak. A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface. *Proceedings of the IEEE*, vol. 65 : pp. 1448–1461, November 1974.
- [KR07] R. Khelifi and P. Russer. Analysis of Transient Radiated Interferences by the Hybrid TLM-IE MoM Algorithm. *Microwave Integrated Circuit Conference*, pages pp. 591–594, 2007.
- [KST04] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M T. Tuley. *Radar Cross Section*, chapter 5, High-Frequency RCS Prediction Techniques, pages pp. 206–209. SciTech, 2004.
- [Lan08] J. Lanoë. *Contributions au Couplage entre la Méthode TLM et la Théorie Physique de la Diffraction pour l'Analyse Électromagnétique d'Antennes dans leur Environnement*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2008.

## Références I

---

- [Lea03] D. Luga and et al. Frame-Based Gaussian Beam Summation Method : Theory and Applications. *Radio Science*, vol. 38 (2), 2003.
- [LPR99] S. Lindenmeier, L. Pierantoni, and P. Russer. Hybrid Space Discretizing – Integral Equation Methods for Numerical Modeling of Transient Interference. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 41 (4) : pp. 425–430, November 1999.
- [MAB08] F. Molinet, I. Andronov, and D. Bouche. *Asymptotic and Hybrid Methods in Electromagnetics*, volume 51 of *Electromagnetic Waves Series*. IET, second edition, 2008.
- [Mag98] S. Le Maguer. *Développement de Nouvelles Procédures Numériques pour la Modélisation TLM : Applications à la Caractérisation de Circuits Plaqués et de Structures à Symétrie de Révolution en Bande Millimétrique*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 1998.
- [Max73] J.C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press – Oxford, 1873.
- [Mea04] A. Monorchio and et al. A Hybrid Time-Domain Technique that Combines the Finite Element, Finite Difference and Method of Moment Techniques to Solve Complex Electromagnetic Problems. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 52 (10) : pp. 2666–2674, October 2004.
- [Mic91] A. Michaeli. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-39 : pp. 719–731, 1991.
- [Mik64] S. G. Mikhlin. *Variational Methods in Mathematical Physics*. MacMillan – New-York, 1964.
- [Mil05] T. A. Milligan. *Modern Antenna Design*. John Wiley & Sons, second edition, 2005.
- [MKRS79] R. Mittra, W. L. Ko, and Y. Rahmat-Samii. Transform Approach to Electromagnetic Scattering. *Proceedings of the IEEE*, vol. 67 (11) : pp. 1486–1503, November 1979.
- [MMR97] G. Manara, A. Monorchio, and R. Reggiannini. A Space-Time Discretization Criterion for a Stable Time-Marching Solution of the Electric Field Integral Equation. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 45 (3) : pp. 1237–1242, March 1997.
- [MN01] S. Le Maguer and M. Ney. PML-TLM Node : An Efficient Approach for Full-Wave Analysis of Open Structures. *Int. Journal of Numerical Modelling*, vol. 14 : pp. 129–144, 2001.
- [MPM90] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, and J. A. G. Malherbe. *Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*. Artech House, 1990.
- [MRSK76] R. Mittra, Y. Rahmat-Samii, and W. L. Ko. Spectral Theory of Diffraction. *Applied Physics*, vol. 10 (1) : pp. 1–13, 1976.

- [MW05] A. Mohan and D. S. Weile. A Hybrid Method of Moments - Marching on in Time Method for the Solution of Electromagnetic Scattering Problems. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 53 (3) : pp. 1237–1242, March 2005.
- [NMBS08] M. Naser-Moghadasi, M. Bahadorzadeh, and R. A. Sadeghzadeh. Implementation of a Novel TLM-MoM Hybrid Method for the Analysis of Interference in Antennas. *Information and Communication Technologies : from Theory to Applications*, pages 1–4, 2008.
- [PB02] P. H. Pathak and R. J. Burkholder. *Scattering : Scattering and Inverse Scattering in Pure and Applied Science*, volume vol. 1 , chapter 1.5.2 HIGH-Frequency Methods, pages pp. 245–273. Academic Press, R. Pike and P. Sabatier, 2002.
- [PJ01] P. Persson and L. Josefsson. Calculating the Mutual Coupling Between Apertures on a Convex Circular Cylinder Using a Hybrid UTD-MoM Method. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 49 (4) : pp. 672–677, April 2001.
- [PJ06] L. E. R. Petersson and Jiang-Ming Jin. A Three-Dimensional Time-Domain Finite-Element Formulation for Periodic Structures. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 54 (1) : pp. 12–19, January 2006.
- [PLR98] L. Pierantoni, S. Lindenmeier, and P. Russer. Efficient Analysis of Microstrip Radiation by the TLM Integral Equation (TLM-IE) Method. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 3 : pp.267–1270, June 1998.
- [PLR99] L. Pierantoni, S. Lindenmeier, and P. Russer. Theoretical and Numerical Aspects of the Hybrid MoM-FDTD, TLM-IE and ARB Methods for the Efficient Modelling of EMC Problems. *Microwave Conference*, vol. 2 : pp. 313–316, 1999.
- [Pol07] D. Poljak. *Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Compatibility*. John Wiley & Sons, 2007.
- [Rao99] S. M. Rao. *Time Domain Electromagnetics*. Academic Press, 1999.
- [Rey06] S. Reynaud. *Modélisation Hybride du Canal Radiomobile en Environnement Indoor Complexe. Application aux Systèmes Sans Fil*. PhD thesis, Université de Limoges, 2006.
- [RMGPJL09] J. V. Rofríguez, J. M. Molina-García-Pardo, and L. Juan-Llácer. UTD-PO Formulation for the Multiple-Diffraction of Spherical Waves by an Array of Multimodeled Obstacles. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8 : pp. 379–382, 2009.
- [RMP99] B. S. Randhawa, A. C. Marvin, and A. D. Papatsoris. Hybrid Uniform Theory of Diffraction and Finite Difference Time Domain Method for Scattered Waves. *Electronics Letters*, vol. 35 (6) : pp. 459–460, March 1999.
- [RP60] C. E. Ryan and L. Peters. Evaluation of Edge-Diffracted Fields Including Equivalent Currents for the Caustic Regions. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-18 : pp. 292–299, May 1960.

- [RSM78] Y. Rahmat-Samii and R. Mittra. Spectral Analysis of High-Frequency Diffraction of an Arbitrary Incident Field by a Half-Plane – Comparison with Four Asymptotic Techniques. *Radio Science*, vol. 13 : pp. 31–48, 1978.
- [Sag89] P. Saguet. The 3D Transmission Line Matrix Method : Theory and Comparison of the Process. *International Journal Numer. Model. Electron. Networks Devices Fields*, vol. 4 , 1989.
- [SC95] J. M. Song and W. C. Chew. Multilevel Fast Multipole Algorithm for Solving Combined Field Integral Equation of Electromagnetic Scattering. *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 10 (1) : pp. 14–19, September 1995.
- [SF96] P. P. Silvester and R. L. Ferrari. *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge University Press – New-York, third edition, 1996.
- [Siz05] H. Sizun. *Radio Wave Propagation*. Springer-Verlag, 2005.
- [SM97] H. Suzuki and A. S. Mohan. Ray Tube Tracing Method for Predicting Indoor Channel Characteristic Map. *Electronics Letters*, vol. 33 (17) : pp. 1495–1496, 1997.
- [SR94] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport. Site-Specific Propagation Prediction for Wireless in-Building Personal Communication System Design. *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 43 : pp. 879–891, November 1994.
- [SSW05] A. Skarlatos, R. Schuhmann, and T. Weiland. Solution of Radiation and Scattering Problems in Complex Environments Using a Hybrid Finite Integration Techniques – Uniform Theory of Diffraction Approach. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 53 (10) : pp. 3347–3357, October 2005.
- [Ste87] C. W. Steel. *Numerical Computation of Electric and Magnetic Fields*. Van Nostrand Reinhold Company – New-York, 1987.
- [Str41] J. A. Stratton. *Electromagnetic Theory*. McGraw-Hill – New-York, 1941.
- [TB75] A. Taflove and M. E. Brodwin. Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell’s Equations. *IEEE Trans. MTT*, 1975.
- [TM94] R. Tiberio and S. Maci. An Incremental Theory of Diffraction : Scalar Formulation. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-42 : pp. 600–612, 1994.
- [TMT95] R. Tiberio, S. Maci, and A. Toccafondi. An Incremental Theory of Diffraction : Electromagnetic Formulation. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-43 : pp. 87–96, 1995.
- [TN75] G. A. Thiele and T. H. Newhouse. A Hybrid Technique for Combining Moment Methods with the Geometrical Theory of Diffraction. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-23 (1), January 1975.

- 
- [Tra97] N. Peña Traslavina. *Contribution au Développement de Conditions aux Limites Absorbantes pour la Méthode TLM avec Applications à l'Analyse de Circuits Hyperfréquences*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 1997.
- [Tri08] P. Triwong. *Modélisation Numérique 3D des phénomènes Couplés dans les Procédés d'Élaboration par Induction : Couplage Faible et Couplage Fort*. PhD thesis, INP Grenoble, Juillet 2008.
- [Ufi91] P. Y. Ufimtsev. Elementary Edge Waves and the Physical Theory of Diffraction. *Electromagnetics*, vol. 11 : pp. 125–159, 1991.
- [Ufi07] P. Y. Ufimtsev. *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*. John Wiley & Sons, 2007.
- [VCK98] J.L. Volakis, A. Chatterjee, and L. C. Kempel. *Finite Element Method for Electromagnetics*. IEEE Press – Wiley Interscience, 1998.
- [VJ95] P. Vaudon and B. Jecko. A General Formulation for a Asymptotic Expansions with a Pole Near the Saddle Point. *Ann. Télécommun.*, vol. 50 (7-8) : pp. 686–694, 1995.
- [VW09] T. Vaupel and F. Weinmann. Validation of a 3D Near-Field ISAR Imaging Technique with Far-Field RCS Extraction by Means of a Hybrid GO-PO/PTD Ray Tracing Algorithm. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, pages pp. 691–695, March 2009.
- [Wei77] T. Weiland. A Discretization Method for the Solution of Maxwell's Equations for Six-Component Fields. *Electronics and Communication (AEU)*, 1977.
- [Wei06] F. Weinmann. Ray Tracing with PO/PTD for RCS Modeling of Large Complex Objects. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 54 (6) : pp. 1797–1806, June 2006.
- [Wex67] A. Wexler. Waveguide Discontinuities by Modal Analysis. *IEEE Tran. MTT*, vol. MTT-15 (9) : pp. 508–517, September 1967.
- [WP84] R. S. B. Worm and R. Pregla. Hybrid-Mode Analysis of Arbitrarily Shaped Planar Microwave Structures by the Method of Lines. *IEEE Trans. MTT*, vol. MTT-32 (2) : pp. 191–196, February 1984.
- [WSNC00] Y. Wang, S. Safavi-Naeini, and S. K. Chaudhuri. A Hybrid Technique Based on Combining Ray Tracing and FDTD Methods for Site-Specific Modeling of Indoor Radio Wave Propagation. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 48 (5) : pp. 743–754, May 2000.
- [Yee66] K. Yee. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problem Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 14 (3) : pp. 302–307, May 1966.
- [YWK98] C.F. Yang, B.C. Wu, and C.J. Ko. Ray Tracing Method for Modeling Indoor Wave Propagation and Penetration. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 46 (8) : pp. 907–919, June 1998.
- [Zho93] P. B. Zhou. *Numerical Analysis of Electromagnetic Field*. 1993.
-



## Deuxième partie

Modélisation physique de  
phénomènes électromagnétiques  
par une approche multi-agents



# Introduction à la partie II

Nous cherchons à modéliser la propagation des ondes électromagnétiques à travers un système complexe éactif dans lequel un système dynamique décrit les phénomènes et les interactions électromagnétiques.

Nous allons donc étudier dans cette partie, les concepts qui guident notre approche de la modélisation d'un environnement électromagnétique par la méthode éactive, en vue de son instrumentation *via* un système de réalité virtuelle.

Nous débuterons cette partie par une description de ce qu'est la méthode éactive, les concepts et la méthodologie qu'elle fournit pour la modélisation de systèmes complexes tels que le nôtre.

Cette méthode est basée sur le principe d'éaction [VTR91], [Tho07], principe qui vise à étudier par ses interactions, un individu (une entité) et son environnement. Dans ce contexte, nous devons identifier explicitement ce que sont nos entités et la manière dont celles-ci interagissent avec leur environnement.

Ainsi, la modélisation éactive de problèmes de propagation électromagnétique doit reposer sur une définition rigoureuse des entités.

Aussi, il nous faudra définir explicitement les interactions qui peuvent avoir lieu au sein de notre système afin de reconstituer des phénomènes électromagnétiques au sein d'un système de réalité virtuelle.

