

ECOTECHS'2011

Contribution numérique FDTD pour le retournement temporel de signaux électromagnétiques large bande : applications au cas des milieux continus

Ibrahim El Baba^{1,2}, Sébastien Lalléchère^{1,2}, Pierre Bonnet^{1,2}, et Françoise Paladian^{1,2}

¹Clermont Université, Université Blaise Pascal, LASMEA, Clermont-Ferrand, France

²CNRS, UMR 6602, LASMEA, 63177 Aubière, France

ibrahim.elbaba@lasmea.univ-bpclermont.fr

Résumé : Cette communication concerne l'utilisation d'une méthode de Retournement Temporel (RT) pour des applications liées à la propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques non-dissipatifs homogènes ou non. Un code FDTD (Différences Finies dans le Domaine Temporel) bidimensionnel est utilisé pour modéliser la diffraction de champs électromagnétiques dans des domaines inhomogènes. L'utilisation des propriétés du RT permet de réaliser la détection d'objets enfouis avec une bonne précision. Reposant sur l'hétérogénéité du milieu de propagation (sol par exemple), cette dernière peut être optimisée en améliorant le processus de RT.

Mots clés : retournement temporel, électromagnétisme, radar, milieux continus / sols, FDTD, méthodes numériques.

1. Introduction physique

Développé à l'origine dans le domaine acoustique par l'équipe de M. Fink à l'ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles) dans les années 1990, le Retournement Temporel (RT) est basé sur le principe de réciprocité [01]. Le procédé permet de propager des ondes (acoustiques, électromagnétiques, ...) en sens inverse vers l'instant et la position de la source qui les a générées. Cette rétro-propagation s'appuie théoriquement sur la réversibilité de l'équation d'onde vis-à-vis du temps. Comme évoqué précédemment le RT offre la possibilité d'une double focalisation à la fois en temps et en espace avec des propriétés liées aux caractéristiques du dispositif de RT utilisé. Le procédé de RT repose sur la propagation 'inverse' d'ondes qu'elles soient acoustiques ou ElectroMagnétiques (EM). Dans ce cadre, des capteurs électroniques (Miroirs à Retournement Temporel, MRT), permettent d'enregistrer et de numériser un signal, puis de le retourner à sa source dans une chronologie temporelle inversée.

Dans la littérature, différents paramètres permettent d'optimiser le processus de retournement temporel en fonction des applications visées, notamment en acoustique [02]. Dans le cadre d'études en électromagnétisme, des travaux précédents ont permis de contrôler la directivité de l'onde focalisante [03], l'amplitude du signal focalisé [04], sa finesse (super-résolution [02, 05]) principalement dans les domaines de la télécommunication [06], de la Compatibilité ElectroMagnétique (CEM) [07] et de la défense [04, 08]. Différents travaux ont également permis de tirer bénéfice de la méthode de RT dans le domaine de la télédétection [09, 10]. Ainsi, à l'heure actuelle, les nouvelles technologies de détection, comme le radar impulsif large bande, autorisent l'identification de substances ou d'objets [08] à travers des milieux (sols, obstacles). L'utilisation de ces technologies conjointement avec la technique de RT peut présenter des avantages notamment dans l'exploitation optimale de données radar.

2. Principes du retournement temporel

Schématiquement, le procédé nécessite deux phases distinctes. Durant la première étape, une source R_0 (Fig. 1) émet une impulsion électromagnétique qui se propage dans le milieu considéré. Comme nous le verrons dans la suite, la source peut être à la fois active (antenne)

ou passive (source indirecte de diffraction). Ceci autorise l'utilisation de la technique RT à la fois afin de contrôler les paramètres (profils, amplitude) d'une source active ou de traiter des problèmes de localisation). Les ondes électromagnétiques sont enregistrées à l'aide des capteurs répartis sur le MRT (R_i). Au cours de la seconde phase, les signaux sont retournés et réémis selon le principe « premier arrivé/dernier sorti » en inversant leur chronologie temporelle. Enfin, l'onde « retournée » se propage et se comporte comme si le champ EM revenait à sa source. Cet instant, dit de « focalisation », correspond alors à l'instant initial ayant donné naissance au pulse EM. Pour plus de détails les principes théoriques du RT sont donnés dans [11, 12].

Théoriquement, les expériences de RT sont menées dans un milieu réversible, i.e. si $\varphi(t)$ est solution de l'équation de propagation des ondes (1), la propagation du signal $\varphi(-t)$ doit mener au même type de solution :

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \Delta \varphi \quad (1)$$

Avec c la vitesse de propagation dans le milieu d'étude et φ représentant indifféremment le champ électrique ou magnétique. Compte tenu de l'équation (1), le principe du RT est applicable en électromagnétisme et une configuration de champs EM peut être rejouée chronologiquement jusqu'à l'instant source initial. L'utilisation de la réversibilité des ondes électromagnétiques sera illustrée dans la suite pour deux applications principales : la détection d'objets enfouis dans un milieu diélectrique sans pertes ainsi que la focalisation en environnement diffractant aléatoire.

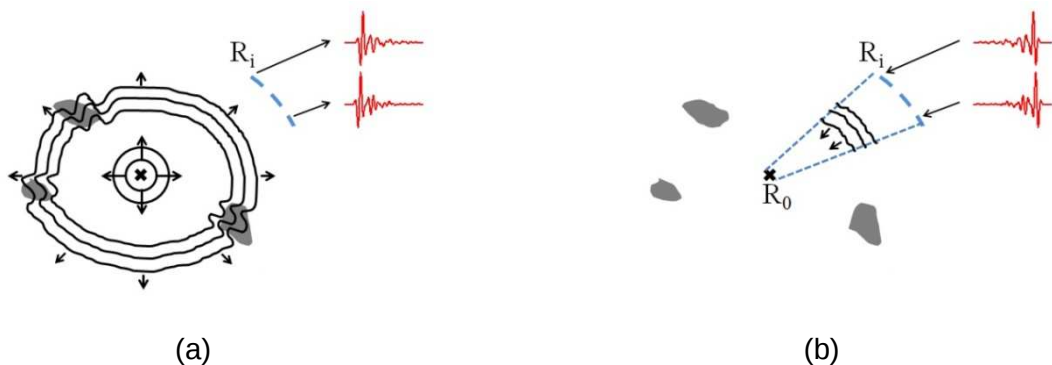


Fig. 1. Première (a) et deuxième (b) phases RT avec un MRT (R_i) et une source (R_0) [12].

3. Applications

Dans cette communication, différentes expériences numériques sont réalisées visant à illustrer l'intérêt de la méthode de RT. Pour des raisons pratiques, les cas traités ont été simulés à l'aide d'un code FDTD [13] bidimensionnel (mode transverse magnétique), permettant du même coup de facilement modifier les dispositifs mis en jeu (sources, capteurs, scène EM). Les mêmes conclusions pourraient être obtenus en trois dimensions à l'aide de tout autre type d'outil numérique. Dans la suite, deux applications sont principalement visées : la détection d'objets et le RT en milieu aléatoire.

3.1 Localisation d'objet par RT

Différents travaux ont été menés concernant l'utilisation du procédé de RT pour la détection d'objets enfouis. Une étude numérique est détaillée dans [09] concernant la décomposition de l'opérateur de RT (méthode DORT). A partir de plusieurs configurations incluant différentes positions des émetteurs et récepteurs, pour une fréquence donnée, il est possible d'en déduire le nombre et la localisation du(des) objet(s). La technique autorise le choix d'une focalisation sur l'un des objets détectés. Dans [10], les auteurs utilisent la décomposition de l'opérateur de

RT en valeurs singulières (SVD) pour caractériser le pouvoir de diffraction d'objets. Le désavantage majeur des techniques précédentes (en dehors de la connaissance précise des paramètres du milieu de propagation) concerne leur besoin d'un post-traitement fréquentiel de l'opérateur (DORT, SVD).

Une alternative consiste à mener la seconde étape du retournement temporel à partir du retournement chronologique des champs diffractés par l'objet, puis à relever la cartographie du champ pour chaque itération en temps. Cette approche paraît difficilement réalisable en raison de son coût mémoire et de la nécessité de repérer l'instant de focalisation (inconnu a priori). Malgré tout, une solution est proposée dans [14]. En effet, l'utilisation conjointe du RT et du produit de convolution entre le signal incident et le retournement du champ EM diffracté par l'objet enfoui permet d'éviter l'écueil précédent. La méthode consiste à réaliser la convolution du signal incident ($x(t)$) avec le signal issu de la diffraction de l'objet retourné temporellement ($y(-t)$). Compte tenu du caractère causal des signaux utilisés et en raison de la limitation du temps de simulation (T_{fin}), le produit de convolution peut être évalué en même temps que la deuxième étape du RT.

On considère ici un exemple simple schématisé sur la Fig. 2a : le Domaine de Calcul (DC) discrétisé uniformément dans les deux directions ($\Delta=1\text{cm}$) est tronqué par des conditions limites absorbantes, la source présente un profil gaussien ($f_{max}=3\text{GHz}$) et 20 récepteurs constituent le MRT. Une plaque métallique mince de 3cm de longueur est enfouie dans un sol représenté par un milieu diélectrique uniforme ($\epsilon_r^m = 3$) à la position $x=80/82$ et $y=50$. Les résultats obtenus sont représentés sur la Fig. 2b. On constate la bonne précision de la méthode qui permet de localiser la plaque métallique décrite précédemment. La méthode peut très bien s'appuyer sur des résultats expérimentaux (mesures radar), les protocoles de post-traitements ainsi que de RT resteraient inchangés.

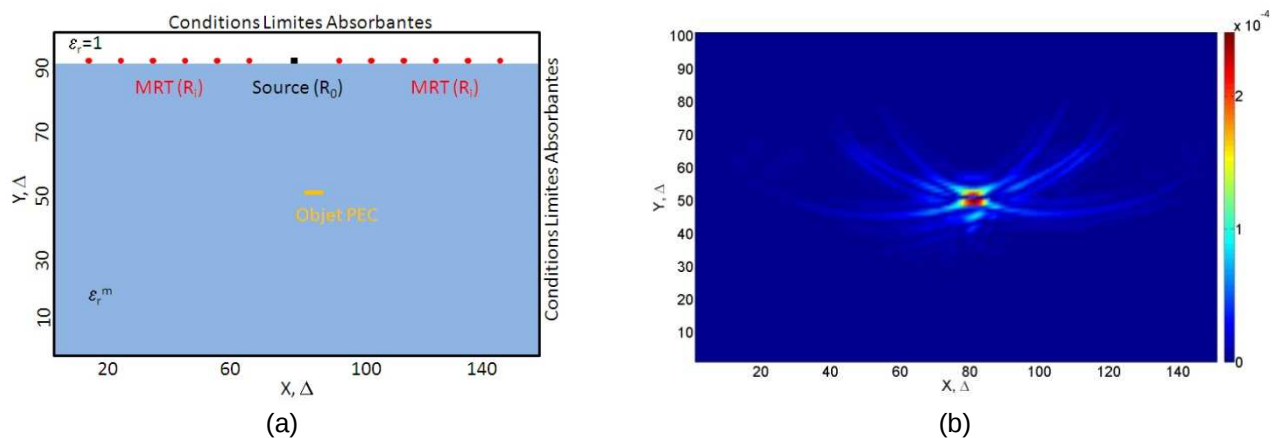


Fig. 2. Localisation d'un objet par RT et produit de convolution. (a) Dispositif numérique : DC (1m x 1.5m), milieu diélectrique (bleu), objet métallique (PEC, Perfect Electric Conductor), source localisée au centre de l'interface air/milieu (R_0), MRT (R_i). (b) Convolution lors du RT et détection.

On peut noter que, si d'autres méthodes similaires existent (sommation cohérente, isolement des cœurs de pieuvres [08]), le RT se distingue par sa grande précision. En déplaçant la source d'émission, il est possible d'améliorer la précision du processus (avec un nombre similaire de mesures au cas d'un B-scan [14]).

3.2 Focalisation en milieu aléatoire

L'utilisation d'un post-traitement adapté de données radar par une méthode de RT associée à un produit de convolution a permis dans l'exemple précédent de localiser un objet enfouis dans un milieu diélectrique uniforme. Cependant, la nécessité d'augmenter le degré de finesse

ou la précision de la localisation peut nécessiter d'améliorer les performances de la méthode. En outre, le cas précédent a été obtenu pour un milieu diélectrique uniforme, ce qui est rarement le cas dans la réalité. Dans cette section, on va constater qu'il est possible de tirer profit de l'hétérogénéité du milieu de propagation. Dans [15], une étude est menée concernant l'introduction de milieux diélectriques aléatoirement inhomogène. L'aléa concerne la permittivité diélectrique relative du milieu :

$$\varepsilon_r(p) = \varepsilon_r^m(p) + \varepsilon_r^a(p) \quad (2)$$

Dans la relation (2), ε_r^a est fonction de la position p du point considéré dans le DC. La valeur moyenne de la permittivité relative est donnée par $\varepsilon_r^m = 5.5$. Le caractère aléatoire du milieu repose sur la variable ε_r^a (Variable Aléatoire, VA). En effet, la description du milieu fait intervenir des hétérogénéités diélectriques telles que la VA ε_r^a est donnée en fonction de sa position dans le domaine par une loi gaussienne de variance δ et de moyenne nulle. L'existence d'une dépendance d'une position à une autre dans le DC est déterminée par une fonction de corrélation faisant intervenir une grandeur caractéristique : la longueur de corrélation γ [15].

La simulation est réalisée dans ce cas pour un DC 60cm x 60cm (discrétisation uniforme $\Delta=1$ cm). La source est placée en position ($x=12/y=30$), son profil temporel est un sinus modulé par une gaussienne (fréquence centrale $f_c=500$ MHz). Le MRT est composé de 16 récepteurs situés à droite du DC, lui-même limité par des conditions absorbantes. La Fig. 3 représente la distribution du champ E_z dans le DC à l'instant de focalisation concernant deux types de milieux aléatoires présentant une même valeur moyenne $\varepsilon_r^m = 5.5$. On constate que l'amplitude et la résolution (largeur de la tache focale) de la focalisation augmentent relativement avec la variance δ . L'apparition d'inclusions diélectriques aléatoires dans le milieu peut, selon les propriétés statistiques de ce paramètre, améliorer notablement les performances du processus de RT.

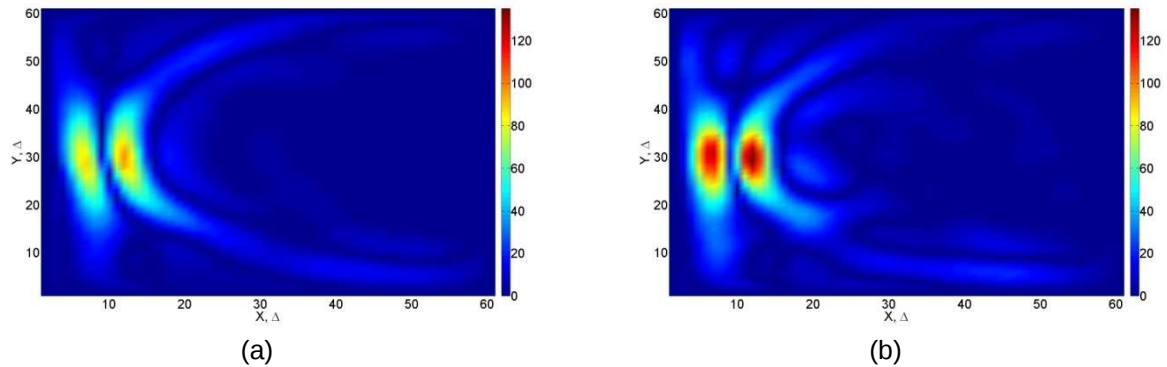


Fig. 3. Distribution du champ électrique focalisé (en V/m) avec une variance (δ) du milieu aléatoire de (a) 0,055 ; (b) 0,3025 pour des valeurs fixées du coefficient de corrélation γ ($\gamma=0.06$).

4. Conclusion

Dans cette communication, la technique du RT a été utilisée pour des applications dans des milieux diélectriques continus. L'utilisation conjointe du RT et d'une convolution entre signaux incident et de l'objet diffractant permet, à partir d'une seule mesure radar, de localiser un objet enfoui. La présence d'inclusions diélectriques peut, sous certaines conditions statistiques, améliorer la résolution générale du procédé. Concernant le domaine de la télédétection, d'autres méthodes existent [08] et peuvent être envisagées en complément des travaux présentés. En outre, la réalisation de mesures expérimentales sur échantillon de sol peut permettre d'apporter des expériences complémentaires.

5. Bibliographie

01. M. Fink, "Time reversal of ultrasonic fields - Part I: Basic principles ", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 39 (5), pp. 555-566, 1992.
02. J. de Rosny, "Milieux réverbérants et réversibilité", *Thèse*, Université Paris 6, 2000.
03. H. Moussa, A. Cozza, M. Cauterman, "A novel way of using reverberation chambers through time-reversal", *Proceedings of ESA 2009*, ESA Workshop on Aerospace EMC, Florence/Italy, 2009.
04. M. Davy, J. de Rosny, M. Fink, "Focalisation et amplification d'ondes électromagnétiques par retournement temporel dans une chambre réverbérante", *Journées scientifiques URSI, Propagation et Télédétection*, pp. 13-20, France, 2009.
05. M. Fink, "Ondes acoustiques et renversement du temps", Séminaire FIP ENS, 2007.
06. G. Lerosey, "Retournement temporel d'ondes électromagnétiques et applications à la télécommunication en milieux complexes", *Thèse*, Université Paris 7, 2006.
07. I. El Baba, L. Patier, S. Lalléchère, P. Bonnet, "Numerical contribution for time reversal process in reverberation chamber", *Proceedings of APS-URSI 2010, IEEE Antennas and Propagation Symposium*, Toronto/Canada, 2010.
08. L. Desrumeaux, "Contribution à la conception de sources de rayonnement ULB appliquées à l'imagerie Radar et aux rayonnements forte puissance", *Thèse*, Université de Limoges, 2011.
09. G. Micolau, M. Saillard, P. Borderies, "DORT Method as Applied to Ultrawideband Signals for Detection of Buried Objects", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (8), 2003.
10. M. Yavuz, F. Teixeira, "Full time-domain DORT for ultrawideband electromagnetic fields in dispersive, random inhomogeneous media", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(8), pp.2305-2315, 2006.
11. J. de Rosny, G. Lerosey, M. Fink, "Time reversal of electromagnetic waves", *Modeling and computations in electromagnetics*, Springer Berlin Heidelberg, 59, pp. 187-202, 2007.
12. I. El Baba, S. Lalléchère, P. Bonnet, "Time Reversal for Electromagnetism: Applications in Electromagnetic Compatibility", *Electromagnetism*, Intech Open Access Publisher, accepté/à paraître.
13. K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, (2), pp.302-307, 1966.
14. M. Neyrat, "Contribution à l'étude de G.P.R. (Ground Penetrating Radar) multicapteurs. Méthodes directes et inverses en temporel", *Thèse*, Université de Limoges, 2009.
15. M. Yavuz, F. Teixeira, "A Numerical Study of Time-Reversed UWB Electromagnetic Waves in Continuous Random Media", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 4, 2005.