

---

# Télécommunications par retournement temporel dans les environnements complexes

---

*A. Tourin, J. de Rosny, A. Derode, G. Lerosey et Mathias Fink*

*Laboratoire Ondes et Acoustique – UMR 7587, ESPCI – Université Paris VII  
10, rue Vauquelin 75005 Paris  
[arnaud.tourin@espci.fr](mailto:arnaud.tourin@espci.fr)*

---

## Résumé

*Nous présentons une méthode de communication qui repose sur le principe de focalisation par retournement temporel, déjà éprouvé en acoustique, et récemment transposé aux ondes électromagnétiques : une impulsion « test » est émise dans un milieu rempli d'obstacles ou une cavité réverbérante par une antenne placée à l'endroit où l'on souhaite transmettre un message. L'onde résultante est enregistrée par une ou plusieurs antennes, retournée temporellement, « enrichie » du message à transmettre, et renvoyée dans le milieu. Elle revit alors les étapes antérieures de sa vie et reconverge sur sa source en y formant un message intelligible. Outre que cette technique simplifie l'étape d'égalisation puisqu'elle compense les réverbérations du milieu, elle profite des chemins multiples pour focaliser le message sur l'utilisateur, ce qui assure la sécurité de la transmission et permet la communication simultanée avec plusieurs utilisateurs proches les uns des autres.*

*Mots clés : retournement temporel, diffusion multiple, réverbération, MIMO, UWB*

---

## Introduction

Le monde des télécommunications est aujourd'hui confronté à un double défi. D'une part, le développement de l'Internet crée une forte demande pour des communications à très haut débit. D'autre part, le développement du téléphone cellulaire, et plus généralement des moyens de communication sans fil, impose de connecter entre eux des utilisateurs toujours plus nombreux. Aujourd'hui, l'enjeu est donc de trouver des méthodes efficaces qui conjuguent ce double impératif d'une connexion sans fil à haut débit et d'une densité croissante d'utilisateurs, et ce dans des environnements complexes. C'est ce qui explique l'engouement actuellement suscité par les systèmes de communication MIMO (Multiple Input-Multiple Output)<sup>1</sup> et les techniques UWB<sup>2</sup>.

### 1. Les techniques MIMO

En 1996, Foschini<sup>3</sup> a réalisé que la clef pour augmenter la capacité *linéairement* en fonction du nombre d'antennes résidait dans l'exploitation des chemins multiples qui créent de nouveaux « canaux d'information ». L'idée de base consiste à envoyer sur chaque antenne du réseau émetteur un flux différent de données. Si le milieu est suffisamment complexe pour décorréler les signaux captés sur chaque antenne du réseau récepteur, et si le nombre de récepteurs est supérieur au nombre d'émetteurs, il devient théoriquement possible à l'utilisateur de décoder le message émis. Dans le meilleur des cas, le débit est multiplié par le nombre d'antennes émettrices. Foschini a en outre proposé le premier algorithme de codage/décodage exploitant cette idée (algorithme « Blast »). Depuis lors, de nombreuses recherches ont porté sur ces nouveaux systèmes de communication MIMO (Multiple Input-Multiple Output). Pour autant, deux sérieuses limitations demeurent : premièrement, la méthode Blast s'apparente à un algorithme de filtre inverse itératif coûteux en temps de calcul. En outre, il s'agit d'une technique « bande étroite » ; elle suppose en effet que la fonction de transfert est plate en fréquences sur la bande spectrale considérée.

## 2. Les techniques UWB

Dans le contexte des communications *indoor*, une autre voie actuellement envisagée pour augmenter le débit est la mise au point de systèmes UWB (Ultra Wide Band) pour lesquels la bande passante devient de l'ordre de la fréquence porteuse. Dans ces circonstances, la diffusion multiple crée au niveau du récepteur des répliques du message à transmettre et l'interférence inter-symbole (ISI) qui en résulte peut devenir considérable ce qui complique l'étape d'égalisation. Ce phénomène de « diffusion multiple » devient important dès lors que la distance qui sépare l'émetteur du récepteur excède le libre parcours moyen, i.e. la distance moyenne entre deux diffusions. Pour une fréquence de 2 GHz, il peut être estimé à quelques mètres à l'intérieur d'un bâtiment. C'est ce qui, dans la pratique, limite la portée des techniques UWB à quelques mètres.

## 3. Communication par retournement temporel : validation du principe à l'échelle ultrasonore

Afin de marier les avantages de ces deux techniques, nous proposons une méthode originale qui exploite tout à la fois les chemins multiples créés par le milieu de propagation (pour chaque fréquence du spectre) comme dans les techniques MIMO et un spectre large. Cette méthode est fondée sur le principe du Retournement Temporel (RT). Ces dernières années, le laboratoire Ondes et Acoustique a mis au point une technique de focalisation des ondes acoustiques qui repose sur l'invariance par renversement du temps de l'équation d'onde<sup>4</sup> : une impulsion ultrasonore brève émise d'un point source se propage dans un milieu inconnu; une partie de cette onde est enregistrée par un ensemble de capteurs qu'on appelle Miroir à Retournement Temporel (MRT), numérisée, retournée temporellement, et renvoyée dans le milieu de propagation. L'onde revit alors les étapes antérieures de sa vie et reconverge sur sa source en y reformant une impulsion brève. Ce procédé fonctionne même dans un milieu très réverbérant. Plus surprenant, il tire parti de la réverbération pour focaliser l'onde avec une résolution spatiale meilleure que celle obtenue lorsque le milieu de propagation est purement homogène<sup>5</sup>. Dans un milieu complexe, réverbérant ou rempli d'obstacle, la résolution ne dépend en fait plus de l'ouverture du MRT mais de la taille dudit milieu. Pour une onde suffisamment large bande, la focalisation spatiale reste d'ailleurs possible même si le MRT se limite à un unique capteur.

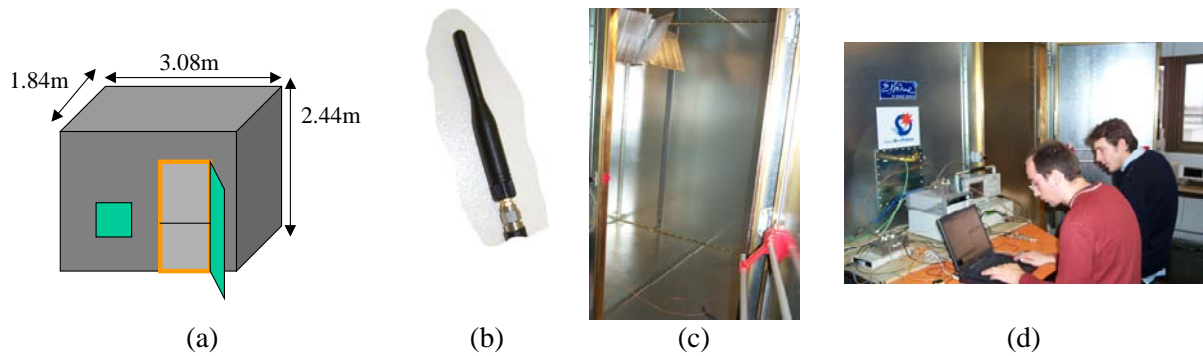
Cette propriété d'*hyperfocalisation* nous a conduits à imaginer une première expérience modèle de communication réalisée avec des ultrasons dans une configuration MIMO-MU (Multiple Input - Multiple Output - Multiple Users). En utilisant un réseau d'antennes large bande fonctionnant en mode « retournement temporel », nous avons montré qu'on peut apprendre à transmettre simultanément, à travers un milieu fortement diffuseur qui « brouille » la propagation, des messages différents à des utilisateurs distincts, même si ces derniers sont très proches les uns des autres<sup>6</sup>. L'intérêt est double. D'une part, le RT compense les réverbérations du milieu, ce qui autorise l'utilisation de signaux large bande et par là même de hauts débits. D'autre part, pour chaque fréquence temporelle du spectre, il profite des multiples canaux spatiaux pour focaliser simultanément les différents messages sur leurs utilisateurs avec une précision telle que les interférences entre eux sont réduites. C'est là une autre façon d'exploiter l'augmentation de la Capacité dans un milieu complexe. Il ne s'agit plus de diversité spatiale en émission (exploité par exemple dans l'algorithme BLAST), mais en réception. Qui plus est, la transmission de l'information est sécurisée puisque le message est focalisé sur l'utilisateur auquel il est destiné. Enfin, cette technique très souple ne requiert aucun calcul.

## 4. Transposition aux ondes électromagnétiques

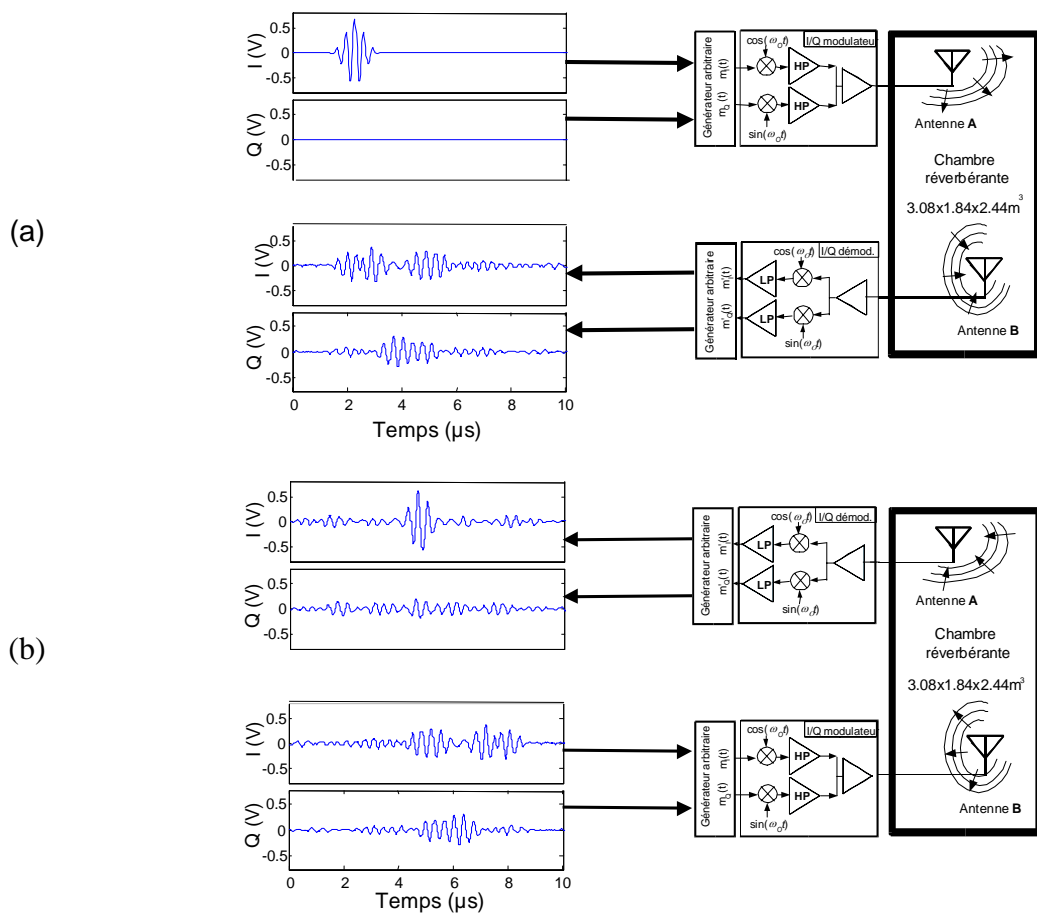
### 4.1 Prototype « SISO/bande étroite »

On conçoit donc tout l'intérêt d'adapter cette technique au cas des ondes électromagnétiques utilisées pour véhiculer l'information en téléphonie mobile ou dans les réseaux locaux sans fil. Un réseau d'antennes à retournement temporel large bande fonctionnant pour les ondes électromagnétiques dans la gamme du GHz est en effet potentiellement un moyen de marier astucieusement les techniques MIMO et UWB. C'est pourquoi nous avons travaillé à la réalisation d'un premier prototype de MRT

SISO (single input – single output) pour les ondes électromagnétiques dans la bande WiFi<sup>7</sup>. Le but est de réaliser le retournement temporel de signaux radiofréquences. Un tel signal s'écrit  $s(t)=m_I(t)\cos(2\pi f_0 t)+m_Q(t)\sin(2\pi f_0 t)$  où  $f_0=2.45\text{ GHz}$  est la fréquence de la porteuse et  $m_I(t)$  et  $m_Q(t)$  représentent respectivement la modulation en phase et en quadrature (ou signaux en « bande de base »). Lorsqu'un tel signal est capté par une antenne, il s'agit donc de synthétiser le signal  $s(-t)=m_I(-t)\cos(2\pi f_0 t)-m_Q(-t)\sin(2\pi f_0 t)$  et de le réémettre par la même antenne. Compte tenu de la difficulté à numériser à un coût raisonnable des signaux à cette fréquence, notre idée a été de reporter l'opération de retournement temporel en bande de base.



**Figure 1 :** Montage expérimental pour la première expérience de retournement temporel pour une onde électromagnétique. a) Dimensions de la cavité réverbérante. b) Antenne utilisée comme MRT. Une antenne identique est utilisée comme « cible ». c) Vue de la cavité ouverte. d) Vue d'ensemble

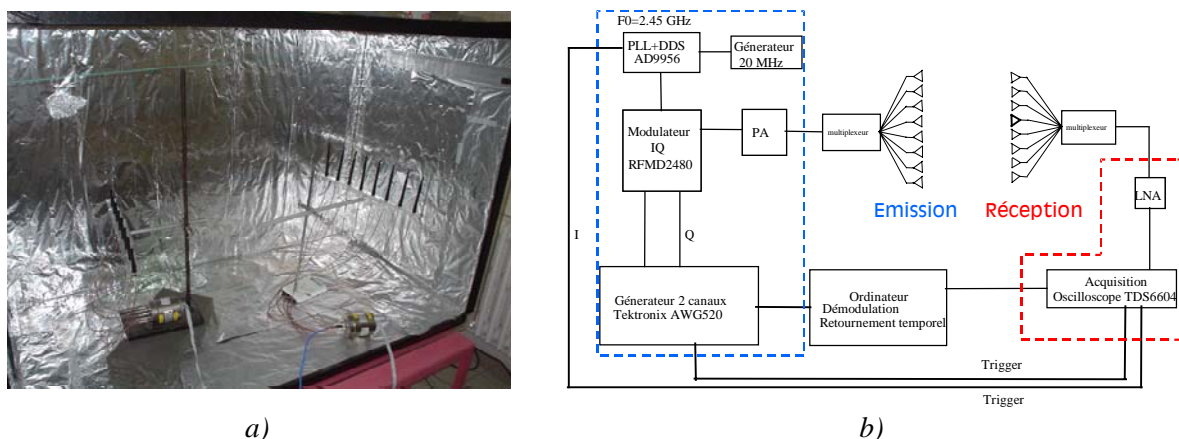


**Figure 2 :** a) Phase d'émission/réception b) Retournement temporel et ré-émission

Une première antenne transmet dans une chambre réverbérante (cf. Fig. 1) une impulsion brève  $e(t)=m_i(t)\cos(2\pi f_0 t)$ , de fréquence centrale  $f_0=2.45\text{ GHz}$ , la largeur spectrale de la modulation  $m_i(t)$  étant de l'ordre de 10 MHz (Fig. 2). Après réception par une seconde antenne, la modulation, ou signal en « bande de base », est extraite et codée sur deux entrées ( $I$  et  $Q$ ) en phase et en quadrature. Compte tenu des réflexions multiples subies par l'onde au cours de sa propagation, la modulation du signal réceptionné est significativement allongée (figure 2.a). Chacun des deux signaux  $I$  et  $Q$  est alors numérisé avec une fréquence d'échantillonnage de 40 MHz, i.e. très inférieure à la fréquence de la porteuse, et retourné temporellement. Ces nouveaux signaux sont alors utilisés pour moduler la porteuse dont on a conjugué la phase. Le signal ré-émis par l'antenne initialement réceptrice refocalise alors sur l'antenne initialement émettrice pour y reformer l'impulsion originelle (figure 2.b). En plus de la *compression temporelle* obtenue sur l'antenne initiale, nous avons en outre vérifié que l'onde est spatialement focalisée avec une précision de l'ordre de la longueur d'onde. C'est dire qu'en profitant de la complexité du milieu, il est possible avec une unique antenne d'atteindre une résolution optimale comme les premières expériences réalisées avec des ultrasons l'avaient montré.

## 4.2 Prototypage « MIMO–large bande »

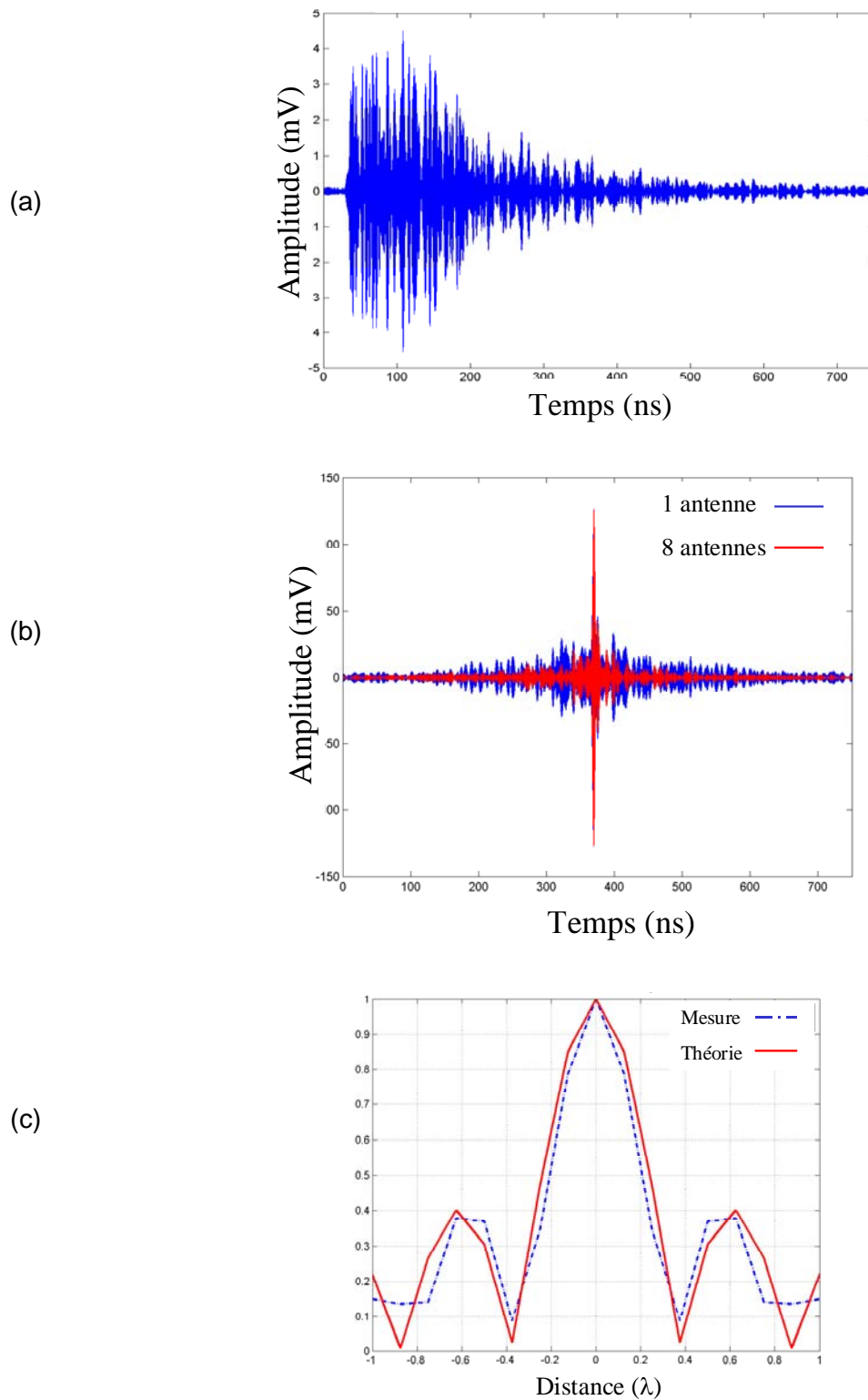
Afin de nous rapprocher d'une situation expérimentale réaliste pour l'UWB, nous avons conçu par la suite un prototype de MRT à 8 antennes fonctionnant dans une bande de 200 MHz autour de 2.45 GHz (figure 3)<sup>8</sup>.



**Figure 3 :** Montage expérimental de type MIMO pour une expérience de retournement temporel électromagnétique large bande. a) Vue des réseaux d'antennes dans une cavité réverbérante. b) Schéma du montage. Le réseau d'émission est utilisé comme MRT pour focaliser sur l'une des antennes du réseau récepteur. Les autres antennes du réseau récepteur permettent de quantifier la focalisation spatiale.

Un signal est synthétisé sur une bande passante de 250 MHz par un générateur Tektronix AWG520 et envoyé sur la voie  $I$  du modulateur. Il est utilisé pour moduler une porteuse à 2.45 GHz ; le signal  $e(t)$  résultant dure 10ns. Grâce à un multiplexeur,  $e(t)$  est successivement émis par chaque antenne du réseau émetteur, et mesuré sur l'antenne du réseau récepteur sur laquelle on souhaite focaliser, dénommée dans la suite « antenne-cible ». En vertu du principe de réciprocité, les signaux ainsi enregistrés sont les mêmes que ceux qui seraient enregistrés sur chacune des antennes du réseau émetteur si l'antenne-cible émettait le signal  $e(t)$ . Ces signaux sont numérisés par un oscilloscope qui échantillonne à 20Gs/s et démodulés numériquement. Comme on peut le constater sur la figure 4.a, ils sont extrêmement allongés. Ils sont alors démodulés numériquement pour produire les signaux  $I$  et  $Q$ . Ces derniers sont retournés temporellement et utilisés pour moduler la porteuse conjuguée en phase. Les signaux ainsi synthétisés sont émis successivement par chaque antenne du MRT. Pour chaque nouvelle émission, le signal résultant est mesuré sur chaque antenne réceptrice grâce à un multiplexeur en réception. La somme des signaux mesurés pour chaque émission permet de remonter au signal

recréé sur l'antenne cible (Fig. 4.b) ainsi que sur les antennes adjacentes, ce qui permet de quantifier la focalisation spatiale (Fig. 4c). On retrouve sur l'antenne-cible un signal bref, signe d'une excellente compression temporelle.



**Figure 4 :** a) Exemple de réponse impulsionnelle de la cavité. b) Compression temporelle obtenue sur l'antenne cible. c) Tache focale mesurée (trait pointillé) et ajustement théorique (trait plein).

La tache focale mesurée (figure 4.c) est parfaitement ajustée par la fonction analytique exprimant la corrélation spatiale de la projection du champ électrique sur l'axe de l'antenne. Sa largeur vaut une longueur d'onde, preuve que la limite de diffraction est atteinte.

## 5. Vers une nouvelle méthode de communication ?

Cette étape « d'apprentissage » étant réalisée, il suffit, pour communiquer un message vers la cible, de convoluer ledit message par les signaux permettant d'y focaliser. Plus généralement, on peut ainsi apprendre à communiquer simultanément 8 messages distincts vers les 8 antennes réceptrices, même si ces dernières sont séparées d'une longueur d'onde. Les premières expériences que nous avons réalisées en utilisant ce principe ont permis d'obtenir des débits typiques de 800 Mbits/s.

## Conclusion

Nous avons décrit une méthode de communication originale qui exploite tout à la fois les chemins multiples créés par le milieu de propagation (pour une fréquence donnée du spectre) comme dans les techniques MIMO et un spectre large dans l'esprit des techniques UWB. Cette méthode est fondée sur le principe du retournement temporel que nous avons récemment transposé à l'électromagnétisme. Des expériences à petite échelle réalisés avec des ultrasons ont permis de valider la technique. Parallèlement, nous avons construit un MRT électromagnétique mono-voie fonctionnant autour de 2.45 GHz dans la bande WiFi puis un MRT comportant 8 antennes et de bande passante accrue (200 MHz).

## Remerciements

Nous remercions le Département d'Electromagnétisme de Supélec, et en particulier A. Azoulay and V. Monebhurrin qui ont mis à notre disposition une chambre réverbérante pour les expériences réalisées avec le premier prototype.

Notre travail s'inscrit dans le cadre du projet MIRTEC soutenu par l'ANR.

## Références bibliographiques

1. P. Guguen, G. El Zein, « Les techniques multi-antennes pour les réseaux sans fil », Edition Hermès, Paris, Mars 2004.
2. B. Uguen, F. Tchoffo-Talom, G. Chassay, 2005, «UWB Radio Link Modeling in Indoor Environment », Ultra-Wideband/Short-Pulse Electromagnetics 7 Book (UWB SP 7).
3. G. J. Foschini, M. Gans, Wireless Personal Communications **6**, 311 (1998)
4. M. Fink, « Time-reversed Acoustics », Scientific American, **281**, 91-97 (1999); M. Fink «Les miroirs à retournement temporel», Pour la Science **268**, 66-73 (2000)
5. A. Derode, A. Tourin and M. Fink, «Random Multiple Scattering of Sound, II. Is Time Reversal a self averaging process», **Phys. Rev. E** **64**, 036606-1-036606-13 (2001)
6. A. Derode et al., «Taking advantage of multiple scattering to communicate with time-reversal antennas», Phys. Rev. Lett. **90** (1), 014301 (2003)
7. G. Lerosey et al., «Time Reversal of electromagnetic waves», Phys. Rev. Lett. **92**, 194301 (2004)
8. G. Lerosey, J. de Rosny, A. Tourin, A. Derode, M. Fink, «Time Reversal of Wideband Microwaves», accepté pour publication dans **App. Phys. Lett**