



**HAL**  
open science

## Transmissions sans fils à 45 GHz pour la réalisation d'un réseau de type WINoB (Wireless Interconnect Network on Board)

Thierry Le Gougec, Pierre-Marie Martin, Ihsan El Masri

### ► To cite this version:

Thierry Le Gougec, Pierre-Marie Martin, Ihsan El Masri. Transmissions sans fils à 45 GHz pour la réalisation d'un réseau de type WINoB (Wireless Interconnect Network on Board). 20ième Journée Nationales microondes, IETR, May 2017, Saint Malo, France. hal-01534391

**HAL Id: hal-01534391**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-01534391>**

Submitted on 7 Jun 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Transmissions sans fils à 45 GHz pour la réalisation d'un réseau de type WINoB (Wireless Interconnect Network on Board).

Thierry Le Gouguec, Pierre-Marie Martin, Ihsan El Masri

Lab-STICC/UBO UMR CNRS 6285 : 6 Avenue Victor Le Gorgeu CS93837, 29238 BREST CEDEX 3  
Thierry.Legouguec@univ-brest.fr

**Résumé** – Afin de développer des réseaux sans fils au sein des circuits électroniques, nous explorons ici des transmissions radio à 45 GHz. Nous présentons tout d'abord les mesures de paramètres  $S$  réalisées in situ sur différents circuits entre deux antennes dipôles. Nous obtenons des niveaux de transmission proches de -10 dB sur une bande de 4 à 5 GHz. Puis, à l'aide de ces mesures et de simulations circuits, nous estimons les performances de ce type de transmission en analysant le diagramme de l'œil pour différentes configurations. Dans les cas les plus favorables, nous obtenons des débits de l'ordre de 2 Gbits/s. Enfin, nous présentons des résultats de simulations de communications sans fils au sein d'une puce électronique autour de 200 GHz en vue de réaliser des systèmes « Wireless Network on Chip ».

### 1. Introduction

Les nouvelles applications de type vidéo HD ou les nouveaux serveurs de calculs sont très exigeants en termes de volume et de débit d'informations à traiter. Les échanges de données entre les CPUs, les mémoires et autres processeurs graphiques ne cessent de croître [1]. Afin d'augmenter les capacités de calcul des puces électroniques, les architectures NoC (Network on Chip) [2] se développent de plus en plus. Un des freins au développement de ces applications vient de la limitation des vitesses et donc des débits, liée aux interconnexions. Ces dernières occupent une surface importante et restreignent la flexibilité de conception. De plus, en raison de l'augmentation des fréquences de travail, elles entraînent des déformations des signaux (problèmes d'adaptation et de diaphonie) et donc des risques d'erreur de plus en plus importants [3]. Plusieurs alternatives aux interconnexions classiques sont envisagées par les industriels [4] et dans la littérature. Citons par exemple, les interconnexions 3D, optiques, RF guidées [5] ou bien encore Radio [6].

Si les interconnexions optiques remplissent un grand nombre des exigences des communications hauts débits (bande passante importante, très bonne résistance aux problèmes d'intégrités des signaux et faibles pertes en transmission), elles restent encore peu compatibles avec les technologies CMOS classiques. D'autre part, les interconnexions RF guidées sont compatibles avec les technologies CMOS actuelles, elles permettent des débits de plusieurs dizaine de Gbits/s [7], mais elles occupent des places importantes sur les cartes et nécessitent un

routage parfois compliqué. Enfin, en raison de leur flexibilité, les interconnexions de type radio sont de plus en plus envisagées pour la réalisation d'échanges de données au sein des cartes [8].

Dans cette communication, nous proposons d'illustrer les possibilités de transmissions sans fils entre circuits placés sur une carte électronique. La fréquence du signal porteur a été fixée à 45 GHz de façon à avoir des dimensions d'antennes compatibles avec une intégration sur les boîtiers des puces électroniques et permettant d'assurer un débit relativement important. Dans une première partie, nous présentons une étude expérimentale portant sur la transmission sans fils entre deux antennes dipôles pour différentes configurations du canal. Dans la seconde partie, nous utilisons ces résultats expérimentaux dans le but de réaliser des simulations circuits d'une transmission OOK (on-off keying). Nous pouvons ainsi estimer les performances en termes de débits envisageables pour ces réseaux sans fils au sein d'une carte électronique de type PCB.

Dans un dernier paragraphe, nous illustrons sommairement les performances en transmission pour des communications radio à 200 GHz en vue de la réalisation de systèmes WiNoC (Wireless Network on Chip) [9].

### 2. Etude de la transmission radio sur une carte PCB à 45 GHz

A partir de la technologie PCB développée lors du projet MIDIMU-HD [10], nous avons conçu des circuits PCB multicouches munis d'antennes dipôles placées au niveau de métallisation supérieur (M1). Cette technologie utilise 8 couches de métallisation sur un substrat diélectrique de type Megtron 6, de permittivité  $\epsilon_R=3.6$  et de tangente de pertes  $\text{tg}(\delta)=0.006$  pour la fréquence de 45 GHz.

Figure 1, nous présentons les circuits réalisés comprenant deux antennes dipôles séparées de 10 mm. Trois cas de figures sont envisagés, le premier correspond au cas de deux antennes placées en vis à vis sans obstacle entre-elles (cas 1), pour le second cas une grille métallique orientée suivant l'axe de propagation a été placée entre les antennes au niveau de métallisation M3 (cas 2) et enfin, dans le dernier cas de figure, la grille métallique a été remplacée par un damier également conducteur (cas 3). Les mesures ont été réalisées sous

pointes à l'aide d'un analyseur Agilent™E8364A dans la bande de fréquences comprise entre 40 et 50 GHz.

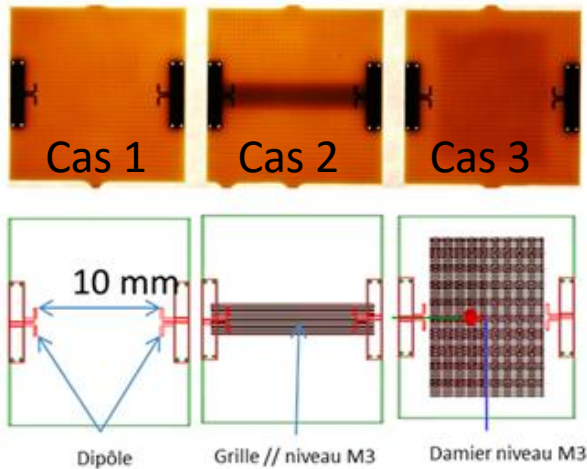


Figure 1. Exemples de circuits PCB multicouches réalisés sur un substrat diélectrique Megtron 6.

Les résultats de mesure des coefficients de réflexion de ces trois cas (Cas 1, 2 et 3) de figure sont illustrés Figure 2. L'adaptation reste quasiment inférieure à -10 dB sur une bande de fréquence de 4 à 5 GHz autour de 47 GHz dans les trois cas. La présence du damier (cas 3) ne perturbe pas ou très peu le niveau de réflexion tandis que la présence d'une grille parallèle se prolongeant sous les antennes améliore l'adaptation dans la bande de 45 à 49 GHz.

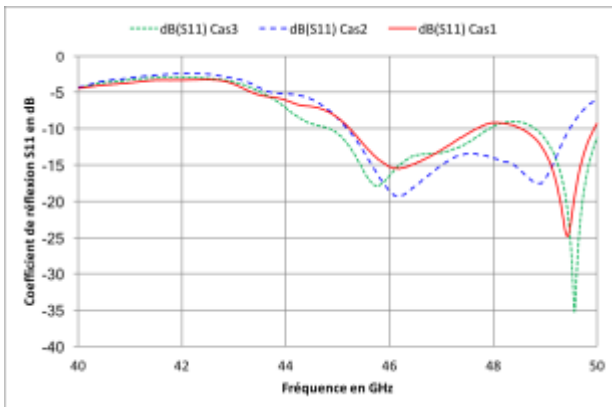


Figure 2 : Coefficients de réflexion mesurés pour les 3 cas de figure (Cas 1, 2 et 3).

Dans le but d'analyser les effets d'obstacles métalliques sur le canal de transmission, nous présentons Figure 3 le gain en puissance de la paire d'antennes défini par :

$$G_A = \frac{|S_{21}|^2}{(1-|S_{11}|^2)(1-|S_{22}|^2)} \quad (1)$$

Où les paramètres  $S_{ij}$  sont ceux issus des mesures précédentes.

Quelle que soit la configuration étudiée, le gain en puissance mesuré est compris entre -10 et -15 dB sur une bande passante de 4 GHz centrée autour de 47 GHz. Les obstacles métalliques ne modifient que très peu le gain et nous observons une amélioration de celui-ci dans le cas de la présence d'une grille orientée parallèlement à l'axe entre les deux antennes.

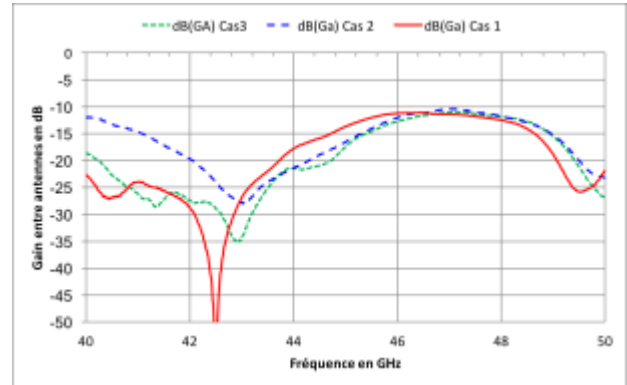


Figure 3. Gain réalisé entre deux antennes placées sur un substrat Megtron 6.

A partir des antennes dipôles précédentes nous avons effectué plusieurs tests de propagation sans fils sur des cartes électroniques courantes en présence de composants. A titre d'exemple, nous présentons Figure 4 une photo d'un des circuits tests avec deux cas de figure (cas 4 et 5). Les dipôles sont collés sur les boîtiers de deux puces et séparés d'environ 18 mm (cas 4 : antennes en vis-à-vis) à 20 mm (cas 5 : antennes en diagonale). Les mesures des paramètres S sont présentées Figure 5 et nous obtenons une adaptation inférieure à -10 dB sur une bande de fréquences comprise entre 4 GHz (cas 4) et 5 GHz (cas 5). Les niveaux de transmission mesurés sont d'environ -30 dB sur une bande de 1 à 2 GHz. Si les coefficients de réflexion restent comparables à ceux obtenus dans les cas 1, 2 et 3, la transmission est bien sûr nettement atténuée en raison des nombreux obstacles métalliques présents entre les antennes ce qui entraîne de nombreux trajets multiples.

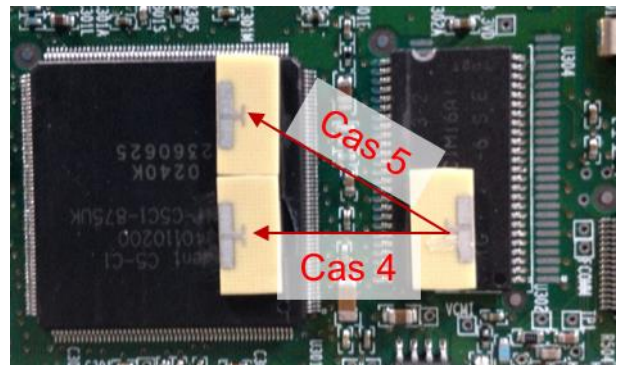


Figure 4 : Photographie de circuits de test de transmission sans fils in situ sur carte PCB.

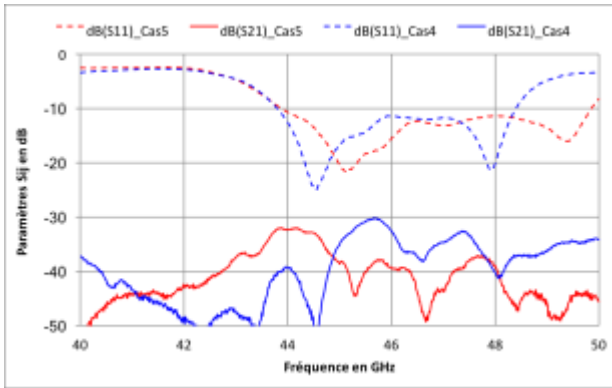


Figure 5 : Paramètres  $S_{ij}$  mesurés dans le cas d’une transmission sans fils sur carte PCB (Cas 4 et 5).

### 3. Analyse des débits possibles

Les paramètres  $S$  mesurés des structures précédentes ont ensuite été utilisés pour évaluer les débits numériques envisageables pour ce type de transmission. Nous présentons Figure 6 le schéma de simulation ADS<sup>®</sup> utilisés lors de cette étape de test. Nous avons considéré ici une modulation d’amplitude (émetteur de type OOK) basée sur une porteuse  $F_P$  à 47 GHz pour les cas 1, 2 et 3, 45,7 GHz pour le cas 4 et 44,2 GHz pour le cas 5. Ces fréquences ont été choisies car elles correspondent au maximum de transmission dans la bande pour chacun des cas de figure. Les signaux binaires ont une fréquence de  $F_{bin}$  réglable. Nous avons considéré un récepteur synchrone composé d’un amplificateur de gain réglable  $G_{dB}$ , d’un multiplieur, d’un filtre passe-bas de fréquence de coupure égale à deux fois  $F_{bin}$ . Finalement une porte inverseuse permet une remise en forme des signaux.

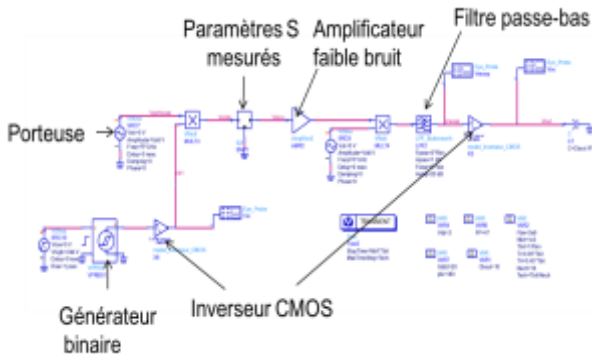


Figure 6 : Schéma de simulation de transmissions d’informations binaires à l’aide de liens radio au sein d’une carte PCB.

A l’aide de ces schémas de simulation, nous avons évalué les diagrammes de l’œil pour différentes configurations de canal. A titre d’exemple, nous présentons Figure 7 les diagrammes de l’œil obtenus après le filtre passe-bas et après la porte inverseuse de remise en forme pour le Cas 2 et en ayant considéré un signal binaire à la fréquence de 2 GHz. Les caractéristiques des diagrammes de l’œil avant la remise en forme pour les différents canaux sont résumées Tableau 1.

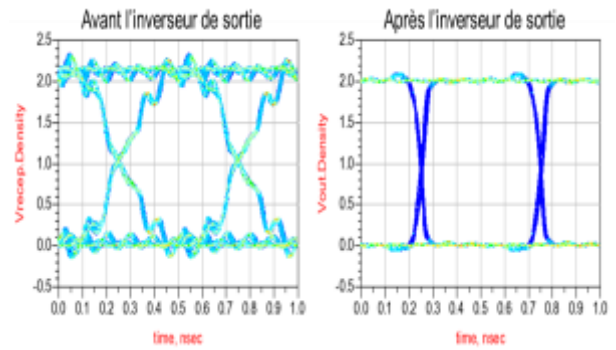


Figure 7 : diagrammes de l’œil de la transmission entre deux antennes distantes de 10 mm (cas 2) pour une fréquence  $F_{bin}=2$  GHz.

Cas	Fbin (GHz)	Fp (GHz)	GdB	Niveau 1 (V)	Niveau 0 (V)	Hauteur (V)	largeur (ps)	jigue (ps)
1	2	47	12	2,04	-0,06	495	1,68	5
2	2	47	12	2,66	0,019	487	2,29	12
3	2	47	12	2,45	-0,023	480	2,11	11
4	1	45,6	32	2,63	0,15	955	1,49	45
5	1	44,2	32	2,82	0,2	940	1,84	60

Tableau 1 : caractéristiques des diagrammes de l’œil avant remise en forme pour les 5 Cas.

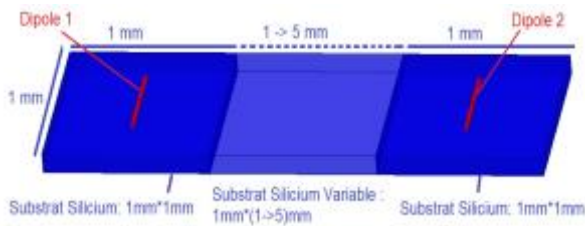
Pour 3 premiers cas nous avons démontré les possibilités de transmettre des débits de l’ordre de 2 Gbits/s par ce type de transmission sans fils au sein de circuits PCB multicouches en considérant des gains en réception réalisables de 12 dB. Dans les deux derniers cas, dans un environnement plus complexe et moins favorable (carte électronique avec de nombreux composants), nous avons obtenu des débits de l’ordre de 1 Gbits/s associés cependant à des gains en réception élevés de 32 dB.

Suite à ces résultats, nous avons cherché à étudier le canal de transmission sans fils pour des communications intra-puces à des fréquences plus élevées.

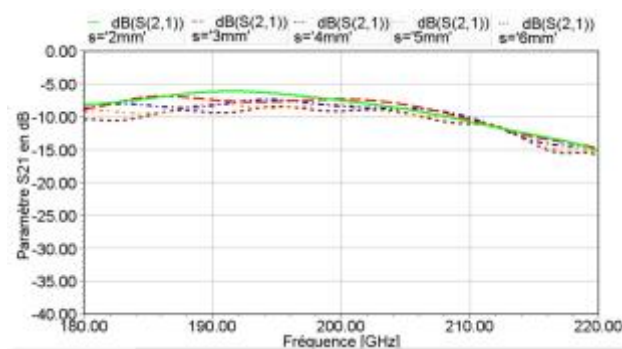
### 4. Exemples de transmissions intra-puces à 200 GHz

Pour réaliser des réseaux sans fils au sein des puces des systèmes WiNoC, il est nécessaire de travailler à des fréquences plus élevées notamment pour limiter la taille des antennes et obtenir des débits importants. Dans le cadre du projet BBC financé par le Labex COMINLABS, nous avons étendu les études précédentes au cas des transmissions intra-puces sur de faibles distances et avec une porteuse à 200 GHz. A titre d’exemple, nous présentons Figure 8 la structure modélisée sous HFSS<sup>®</sup> comprenant deux dipôles réalisés sur un substrat silicium de 100  $\mu\text{m}$  d’épaisseur. Nous avons fait varier la distance séparant les dipôles de 2 à 6 mm. Les résultats de simulations électromagnétiques de cette structure qui sont présentés Figure 9, montrent des niveaux de transmission relativement constants entre -5 et -10 dB sur une large bande passante allant de 180 à 205 GHz. Ces niveaux de transmission permettent

d'envisager l'utilisation de transmissions sans fils pour des applications de type WiNoC au sein des puces.



**Figure 8 : Structure de propagation entre deux antennes dipôles sur silicium à 200 GHz.**



**Figure 9 : paramètres de transmission S21 simulés entre deux dipôles sur un substrat silicium et pour différentes distances entre les antennes.**

## 5. Conclusion

Dans le but de développer des réseaux sans fils sur carte PCB (WiNoB) ou bien encore des systèmes WiNoC (Wireless Network on Chip), nous avons entrepris d'étudier la propagation entre deux antennes dipôles réalisées sur un substrat diélectrique multicouches et placées dans différents environnements de propagation des signaux. Pour cette étude expérimentale, la fréquence de travail a été choisie autour de 45 GHz afin d'avoir des dimensions d'antennes réduites facilement intégrables dans les boîtiers des composants. Dans les cas où le canal est relativement simple nous avons obtenu en mesures, des niveaux de transmission entre les deux antennes de l'ordre de -12 dB, sur une bande de 4 à 5 GHz. Ces résultats, complétés par des simulations, nous ont permis de démontrer la faisabilité d'une transmission à 2 Gbits/s entre deux antennes en présence ou non d'obstacles métalliques. Pour des environnements de propagation beaucoup moins favorables, nous avons mesuré des niveaux de transmission de l'ordre de -30 dB sur une bande de 1 à 2 GHz nous permettant d'obtenir des débits de l'ordre de 1 Gbits/s. Dans une dernière partie, nous avons présenté les premiers résultats de simulation de communications intra-puces pour des applications de type WiNoC (Wireless Network on Chip) à 200 GHz.

## 6. Remerciements

Ces travaux sont en partie financés par le Labex COMINLABS dans le cadre du projet BBC.

Tous les calculs ont été réalisés sur le cluster de calcul hautes performances WINCHYPS1. Ce cluster est géré par la plateforme TechHy du Lab-STICC.

## 7. Références

- [1] K. Kawasaki *et al.*, "A millimeter-wave intra-connect solution," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 12, pp. 2655–2666, 2010.
- [2] L. Benini and G. De Micheli, "Networks on Chips : A New SoC," *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 35, no. 1, pp. 70–77, 2002.
- [3] A. Deutsch, G. V. Kopcsay, P. Restle, H. H. Smith, G. Katopis, W. D. Becker, P. W. Coteus, C. W. Surovic, B. J. Rubin, R. P. Dunne, Jr., T. Gallo, K. A. Jenkins, L. M. Terman, R. H. Dennard, G. A. Sai-Halasz, B. L. Krauter, and D. R. Knebel, "When are Transmission-Line Effects Important for On Chip Interconnections?," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 45, no. 10, pp. 1836–1846, 1997.
- [4] "International Technology Roadmap for Semiconductors: Interconnect," 2007.
- [5] Y. C. Mombo Bousougou, T. le Gouguec, Y. Quere, D. le Berre, P. M. Martin, and F. Huret, "Electromagnetic analysis of RF interconnect," *IEEE Work. SPI 2008 Avignon*, pp. 1–4, May 2008.
- [6] P. M. Martin, T. Le Gouguec, and N. Mahdi, "Wireless Interconnects by using Printed Antennas for Inter-Chip Communications in PCB Context," in *45th European Microwave Conference*, 2014, pp. 1789–1792.
- [7] A. Briere *et al.*, "WiNoCoD : Un réseau d'interconnexion hiérarchique RF pour les MPSoC," in *CompPAS'2014 : Parallélisme/Architecture / Système*, 2014.
- [8] K. Okada *et al.*, "Full Four-Channel 6.3-Gb/s 60-GHz CMOS Transceiver With Low-Power Analog and Digital Baseband Circuitry," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 1, pp. 46–65, 2013.
- [9] D. Ditomaso *et al.*, "Energy-efficient Adaptive Wireless NoCs Architecture," in *International Symposium on Networks on Chip (NoCS), 2013 Seventh IEEE/ACM*, 2013, no. 2, pp. 1–8.
- [10] T. Le Gouguec *et al.*, "Modeling up to 45 GHz of coupling between microvias and PCB cavities considering several boundary conditions," *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 421–430, 2016.