



HAL
open science

Analyse du comportement du canal de propagation radio dans un milieu industriel complexe

Albekaye Traoré, H Boeglen, R Vauzelle, S Boria

► **To cite this version:**

Albekaye Traoré, H Boeglen, R Vauzelle, S Boria. Analyse du comportement du canal de propagation radio dans un milieu industriel complexe. Journées Nationales Micro-Ondes (JNM), May 2017, Saint-Malo, France. hal-01851290

HAL Id: hal-01851290

<https://hal.science/hal-01851290>

Submitted on 29 Jul 2018

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.

Analyse du comportement du canal de propagation radio dans un milieu industriel complexe

A. Traoré^{1,2}, H. Boeglen¹, R. Vauzelle¹, S. Boria²

¹Institut de recherche XLIM - Université de Poitiers, Boulevard Marie et Pierre Curie, 86962 Futuroscope

²Airbus Group, 1 rond-point Maurice Bellonte 31707 Blagnac Cedex
albekaye.traore@univ-poitiers.fr

Résumé – La connaissance du comportement du canal de propagation en environnement industriel complexe est essentielle pour dimensionner efficacement les systèmes de communication sans fil. Dans ce papier, nous effectuons une étude Bande Etroite (BE) et Large Bande (LB) du canal de propagation autour du fuselage central et du caisson central de voilure d'un Airbus A320. Ces études sont réalisées en utilisant un sondeur de canal radio logicielle et un simulateur de propagation radio à tracé de rayon. L'utilisation du simulateur nécessite une description géométrique et électrique de l'environnement. Nous proposons, notamment, une étude paramétrique basée sur l'atténuation du trajet transmis mesurée par le sondeur pour déterminer les propriétés électriques de certains matériaux de l'environnement.

1. Introduction

Actuellement, les industries doivent faire face à de nouveaux besoins liés à l'augmentation des commandes et aux fortes exigences de fabrication. Cette hausse devrait être amplifiée par des besoins de traçabilité totale de l'ensemble du processus. Face à ces contraintes, les industriels travaillent sur le concept d'usine du futur. Ce concept vise à numériser et à automatiser l'ensemble des processus au sein d'une usine à travers des robots collaboratifs, des opérateurs humains ayant des outils connectés et des robots autonomes. Dans ce contexte, il y a un fort échange de données en temps réel entre ces différents agents via un canal de propagation sans fil qui soulève le problème de connectivité du réseau lié à l'état du canal de propagation.

L'environnement industriel, bien qu'indoor, diffère des milieux indoors classiques. C'est pourquoi les modèles de propagation indoor classiques ne peuvent pas être utilisés. En effet, l'environnement industriel est spécifique de par ses grandes dimensions, la présence de grandes structures métalliques et d'autres, particulières au sens géométrique, qui rendent le phénomène de propagation complexe dû aux trajets multiples. En plus de la propagation par trajets multiples, il y a aussi des sources de bruit impulsif [1] [2] telles que les systèmes d'allumage, les régulateurs de tension, les équipements de soudage, les moteurs, les machines lourdes, etc., qui peuvent causer des dégradations considérables aux signaux utiles. Dans ce papier, on ne s'intéresse qu'à la propagation par trajets multiples en environnement

industriel, en particulier à la communication autour de deux sous-ensembles d'avion.

Dans la littérature, un certain nombre de mesures de canaux dans divers environnements industriels ont été menées au cours des dernières années. Les résultats de trois campagnes de mesure Ultra Large Bande (ULB) menées dans deux environnements industriels sur deux plages de fréquences (3,1-10,6 GHz ou 3,1-5,5 GHz) sont présentés dans [3]. Dans [4], les auteurs ont effectué des mesures LB sur la plage de fréquences de 0,8-2,7 GHz dans trois environnements industriels. Les résultats de ces deux papiers montrent que les composantes multi-trajets (MPCs) arrivent en clusters et que le nombre de MPCs requis pour capturer 50% de l'énergie de la réponse impulsionnelle (RI) est très élevé, pouvant atteindre jusqu'à 200. Il est également noté que le profil de retard de puissance (PDP) peut être modélisé par le modèle de Saleh-Valenzuela généralisé. Des études sur la propagation des ondes radio dans deux environnements industriels extrêmement différents, l'un étant très réfléchissant et l'autre très absorbant, sont rapportées dans [5]. L'analyse révèle la présence des MPCs jusqu'à 1000 ns après le premier trajet dans l'environnement très réfléchissant et d'un seul trajet dans l'environnement très absorbant. Dans [6], une analyse des caractéristiques du canal et des statistiques de la dispersion des retards à la fréquence porteuse de 5,85 GHz sur 250 MHz de largeur de bande a été menée dans une cellule de production autour de deux robots en opération. Enfin, Yun et al. [7] ont réalisé des mesures de propagation en BE dans trois environnements industriels sur les fréquences de 900, 2400 et 5200 MHz. Les résultats montrent que le modèle d'atténuation à une pente modélise bien l'affaiblissement de propagation mesuré et que les échantillons d'évanouissement suivent une distribution normale de moyenne nulle. En outre, les propriétés statistiques de la capacité du canal en fonction des paramètres mesurés du modèle d'atténuation à une pente ont été étudiées.

L'objectif global de notre étude est de simuler le canal de propagation en environnement industriel complexe afin d'extraire les caractéristiques LB du canal.

Dans ce papier, nous présentons, dans la section 2, l'environnement industriel étudié. La section 3 présente la problématique et les dispositifs utilisés. La caractérisation électrique de parois est réalisée dans la section 4. Dans la section 5, nous réalisons une première simulation et

caractérisation du canal. Enfin, la conclusion et quelques perspectives sont données dans la section 6.

2. Environnement industriel étudié

L'étude a été réalisée dans un hangar du groupe Airbus destiné aux tests de vieillissement des avions. Ce hangar a une superficie d'environ $120 \times 80 \text{ m}^2$ et une hauteur d'environ 15 m . Les murs et le plafond sont en acier, et le sol est en béton. Le plafond est soutenu par des structures métalliques verticales et horizontales. Le hangar est sectionné en plusieurs zones de travail séparées par de grandes allées droites pour le passage de personnes, de matériaux et/ou de sous-ensembles d'avion. Les sections abritent des sous-ensembles d'avion tels que le fuselage avant, le fuselage central, le caisson central de voilure, etc. On note également la présence de bâtis métalliques, de grandes machines métalliques etc. Dans ce papier, on s'intéresse à la transmission sans fil autour du fuselage central et du caisson central de voilure d'un Airbus A320. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons pas décrire précisément ces éléments. La Figure 1 illustre une description de la macro-géométrie de l'environnement industriel et des sous-ensembles étudiés.

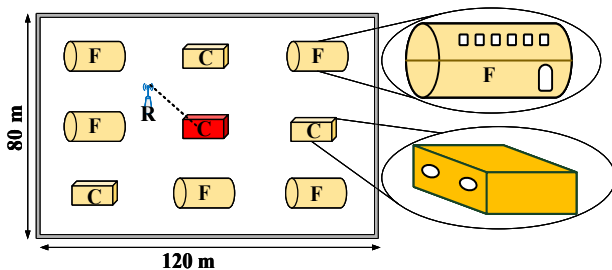


Figure 1. Macro-géométrie de l'environnement : Récepteur (R), Fuselage central (F) et Caisson (C).

3. Problématique

L'objectif de notre étude est de simuler le canal de propagation en environnement industriel complexe. Pour atteindre cet objectif, on est confronté au problème de description de l'environnement et de nombre d'interactions maximum. En effet, la précision des simulations repose en particulier sur la description de l'environnement tant d'un point de vue géométrique qu'électrique. Or, les sous-ensembles d'avion étudiés ont une forme géométrique complexe difficile à modéliser et sont conçus en utilisant des matériaux hétérogènes dont les propriétés électriques sont difficiles à obtenir. L'approche retenue vise à réaliser une modélisation équivalente électriquement et simplifiée géométriquement de l'environnement étudié. Nous présentons, dans la section suivante, les dispositifs utilisés dans la réalisation de notre approche.

3.a. Dispositifs utilisés

Un sondeur de canal radio logicielle développé au sein du laboratoire XLIM a été utilisé pour effectuer les mesures de transmission. Il est basé sur la technique OFDM et des équipements de radio logicielle. L'utilisation de modulations cohérentes (PSK, QAM) dans la transmission OFDM nécessite un procédé

d'estimation de canal souvent réalisé par l'insertion de symboles pilotes connus du récepteur dans les données transmises par les symboles OFDM [8]. Le principe du sondeur développé consiste à remplacer l'ensemble des données par des pilotes. Ainsi, le système OFDM se résume à une opération d'échantillonnage en fréquence et en temps du canal. On obtient alors la fonction de transfert du canal.

Le simulateur utilisé [9] permet de prédire de façon déterministe le comportement du canal radioélectrique. Son principe repose sur un tracé de rayons, associé aux lois de l'Optique Géométrique et de la Théorie Uniforme de la Diffraction. Il prend en compte la description de l'environnement (caractéristiques géométriques et électriques), les informations relatives aux antennes d'émission et de réception, la fréquence porteuse, ainsi que le nombre d'interactions maximum. De ces données, le simulateur calcule la RI complexe du canal radioélectrique et notamment les angles d'arrivée et de départ en azimuth et élévation des trajets. La Figure 2 montre une image du simulateur avec l'environnement expérimental d'Airbus comme environnement de propagation.

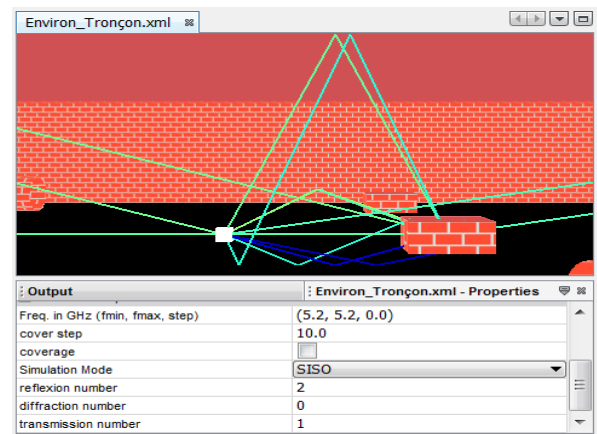


Figure 2. Le simulateur à rayon.

3.b. Approche retenue

Pour simuler le canal de propagation, on se confronte aux deux problématiques à savoir les descriptions géométrique et électrique de l'environnement, et le nombre d'interactions maximum.

Il est tout simplement impossible de modéliser géométriquement l'environnement étudié et ses éléments de manière exhaustive. Nous avons donc fait le choix d'une modélisation de la macro-géométrie de ces derniers. Dans cette optique, le hangar a été modélisé par une structure en acier sans les éléments métalliques soutenant le plafond. Nous avons utilisé des formes canoniques pour représenter le fuselage central et le caisson. Ainsi, nous avons modélisé le fuselage central et le caisson par un cylindre ouvert aux deux extrémités et par un cube, respectivement. À noter que l'épaisseur des sous-ensembles a été prise en compte dans cette modélisation géométrique.

La caractérisation électrique des parois des sous-ensembles d'avion repose sur l'utilisation conjointe du simulateur et des mesures expérimentales de transmission. Nous commençons par estimer la permittivité relative ϵ_r

à partir des mesures de transmission. Cette permittivité relative ϵ_r' et l'atténuation induite par chaque paroi mesurée par le sondeur de canal radio logicielle sont utilisées comme données d'entrée du simulateur pour évaluer la conductivité σ .

Avec les propriétés électriques équivalentes des parois et la simplification de la géométrie (cylindre et cube), nous avons réalisé une étude paramétrique basée sur les mesures LB pour déterminer le nombre d'interactions maximum. À partir de cette étude, nous avons fixé le nombre de réflexions à 2, de diffractions à 0 et de transmissions à 1 (2R0D1T).

La connaissance de toutes ses propriétés nous a permis d'effectuer une simulation de canal dans l'environnement industriel complexe. Cependant, il faut souligner que cette simulation ne prend pas en compte les composantes diffuses dues à la macro-géométrie.

4. Caractérisation électrique des parois

La détermination de la permittivité relative ϵ_r' et la conductivité σ a fait l'objet de développements de nombreuses méthodes. Nous utilisons la méthode basée sur les mesures en transmission LB en espace libre [10]. Elle consiste à effectuer une mesure sans la présence du matériau entre les antennes et à la comparer à une mesure avec le matériau entre les deux antennes.

4.a. Protocole de mesure

La caractérisation électrique a été effectuée sur trois parois dans cette étude. Le Tableau 1 résume les configurations étudiées. Les mesures ont été réalisées dans le domaine fréquentiel en utilisant un analyseur de réseau vectoriel (VNA). Deux antennes large bande, distant de 2,4 m, étaient reliées aux ports 1 (émission) et 2 (réception) du VNA. La plage de fréquences mesurée est de 1 à 6 GHz ce qui implique une résolution temporelle de 0,2 ns (correspondant à une résolution de trajet de 6 cm). La fonction de transfert du canal est déterminée en mesurant le paramètre S_{21} qui représente le coefficient de transmission entre les deux antennes. La RI est obtenue par la transformée de Fourier inverse de la fonction de transfert.

Config.	Liaison	Paroi
Fuse.1	Intérieur fuselage	Plancher en bois
Fuse.2	Fuselage vers l'extérieur	Paroi du fuselage
Caisson	Caisson vers l'extérieur	Paroi du caisson

Tableau 1. Configurations étudiées

4.b. Estimation de ϵ_r' et de σ

L'estimation de ϵ_r' repose sur la technique Time Difference Of Arrival (TDOA) [11] qui consiste à évaluer la différence de marche $\Delta\tau$. Cette différence de marche correspond à la différence temporelle entre le pic principal de la RI sans le matériau (τ_0) et celui de la RI en présence du matériau (τ_M). La permittivité relative ϵ_r' est donnée par (1) :

$$\epsilon_r' = \left(1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_0}\right)^2 \quad (1)$$

La Figure 3 illustre les RI sans et avec la paroi entre les deux antennes. Nous obtenons une différence de marche $\Delta\tau$ de 3,6 ns qui donne une permittivité relative ϵ_r' de 2,1 F/m en utilisant l'équation (1). La paroi caractérisée sur l'exemple de la Figure 3 est le plancher en bois.

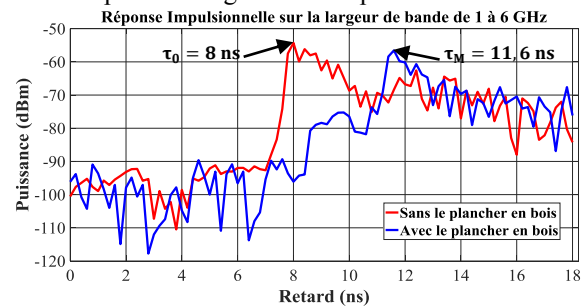


Figure 3. RI avec et sans le plancher en bois

Pour estimer la conductivité σ , nous calculons l'atténuation du trajet transmis mesurée $Att_M(f)$. Elle correspond au ratio entre les réponses fréquentielles sans $H_{SM}(f)$ et avec la paroi $H_{AM}(f)$. Elle est définie par l'équation (2) :

$$Att_M(f) = \frac{H_{SM}(f)}{H_{AM}(f)} \quad (2)$$

Le Tableau 2 résume l'atténuation due aux parois à 2,3 GHz et 5,2 GHz. Ces données montrent, tout d'abord, que la paroi du fuselage (Fuse.2) ayant une épaisseur plus fine atténue moins l'onde électromagnétique que celle du caisson (Caisson). Ensuite, nous remarquons un écart de 7 dB entre la configuration Fuse.1 (bois) et celle de Fuse.2 (composite) qui s'explique par la nature des matériaux. Enfin, nous notons une légère sensibilité de la paroi du caisson à la fréquence contrairement à celle du fuselage.

Fréquence	Fuse.1	Fuse.2	Caisson
2,3 GHz	3 dB	10 dB	13 dB
5,2 GHz	3 dB	10 dB	15 dB

Tableau 2. Atténuation due aux parois

En pratique, on représente la paroi par un matériau équivalent dans le simulateur. Puis, on associe à ce matériau la permittivité relative ϵ_r' obtenue par la méthode TDOA. Enfin, on calcule l'atténuation $Att_S(f)$ induite par ce dernier pour un ensemble de valeurs de conductivités. L'extraction de la conductivité consiste en une recherche itérative de celle qui minimise la fonction erreur $E(\sigma)$. Cette fonction, donnée par (3), combine des mesures expérimentales d'atténuation $Att_M(f)$ et des résultats d'atténuation simulés $Att_S(f)$.

$$E(\sigma) = \sqrt{(Att_M(f_c) - Att_S(f_c))^2} \quad (3)$$

Avec l'exemple du plancher en bois, nous obtenons une conductivité de 0,08 Siemens/m. L'ordre de grandeur des valeurs obtenues correspond à celui de la littérature [11]. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pourrions pas présenter les valeurs des caractéristiques électriques des parois étudiées.

5. Application à la caractérisation du canal

La caractérisation du canal est réalisée par le simulateur en se basant sur la description géométrique présentée dans la Figure 1. Nous nous sommes intéressés

à la transmission autour du caisson en rouge. L'antenne d'émission était placée à l'intérieur de ce caisson et celle de réception à 12 m (cf. Figure 1). La Figure 4 illustre sept RIs mesurées au cours du temps et une RI simulée à 2,3 GHz sur une largeur de bande de 20 MHz. Les RIs mettent clairement en évidence le phénomène de propagation par trajets multiples avec des retards importants qui traduisent des distances de propagation importantes. L'existence de ces trajets longs et énergétiques s'explique par la spécificité de l'environnement. En effet, ce dernier a de grandes dimensions avec des parois principalement métalliques donc fortement réfléchissantes.

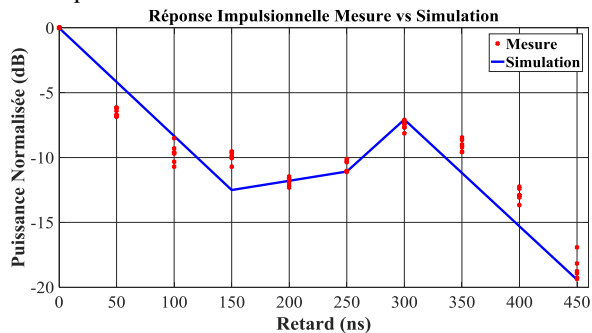


Figure 4. RI mesure vs simulation, config. Caisson

En outre, nous avons remarqué, par moments, une légère différence entre les RIs simulées et mesurées au cours du temps (cf. Figure 5). Cette différence peut être expliquée, d'une part par l'évolution du canal au cours du temps, d'autre part par la prise en compte des composantes diffuses dans les RIs mesurées contrairement à celle simulée.

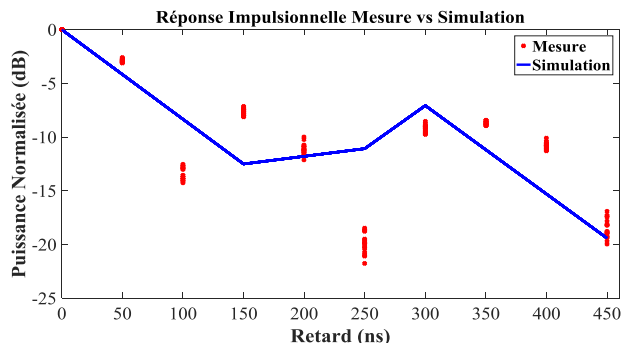


Figure 5. RI mesure vs simulation, config. Caisson

Le Tableau 4 résume la dispersion des retards (τ_{RMS}) et de bande cohérente B_c mesurées et simulées. La connaissance de ces caractéristiques est nécessaire pour calibrer les systèmes de communication et ainsi éviter les problèmes d'interférence inter-symboles. Avec une bande de cohérence (moins de 2 MHz) dix fois inférieure à la bande d'analyse (20 MHz), le canal sondé est sélectif en fréquence. La sélectivité fréquentielle est un phénomène souvent rencontré dans les environnements industriels.

Fréquence		τ_{RMS}	B_c
2,3 GHz	Mesure	128 ns	1,55 MHz
	Simulation	121 ns	1,64 MHz
5,2 GHz	Mesure	111 ns	1,79 MHz
	Simulation	109 ns	1,82 MHz

Tableau 4. Caractéristiques LB config. Caisson

6. Conclusion

Nous avons présenté une simulation LB du canal de propagation à 2,3 GHz et 5,2 GHz en environnement industriel complexe. L'approche proposée repose sur l'estimation des propriétés électriques des parois et une modélisation de la macro-géométrie des sous-ensembles d'avion et de l'environnement. Les dispersions des retards et les bandes de cohérences obtenues sont respectivement de l'ordre de 120 ns et 2 MHz.

Nos prochains travaux se porteront sur la prise en compte des composantes diffuses dans la simulation du canal de propagation en environnement industriel complexe.

Références

- [1] M. G. Sanchez et al., « *Interference and impairments in radio communication systems due to industrial shot noise* », IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1849-1854, 2007.
- [2] K. S. Low et al., « *Wireless sensor networks for industrial environments* », in Proc. Int. Conf. Computational Intelligence Modelling, Control Automation, vol. 2, pp. 28-30, 2005.
- [3] J. Karedal et al., « *A Measurement-Based Statistical Model for Industrial Ultra-Wideband Channels* », IEEE Trans. On Wireless Communications, vol. 6, No. 8, pp. 3028-3037, August 2007
- [4] Y. Ai et al., « *Power Delay Profil Analysis and Modeling of Industrial Indoor Channels* », European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-5, April 2015
- [5] J. Ferrer-Coll et al., « *Characterisation of highly absorbent and highly reflective radio wave propagation environments in industrial application* », IET Communications, vol. 6, pp. 2404-2412, 2012
- [6] B. Hofeld et al., « *Radio Channel Characterization at 5.85 GHz for Wireless M2M Communication of Industrial Robots* », IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 66-73, April 2016
- [7] Y. Ai et al., « *Radio Frequency Measurements and Capacity Analysis for Industrial Indoor Environments* », European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-5, April 2015
- [8] P. Hoehner et al., « *Two-dimensional pilot-symbol-aided channel estimation by wiener filtering* », IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 21-24, 1997.
- [9] F. Escarieu et al., « *Outdoor and indoor channel characterization by a 3D simulation software* », in Proceedings of the 12th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'01), pp. B105-B111, Boston, USA, 2001.
- [10] O. Büyüköztürk et al., « *A methodology for determining complex permittivity of construction materials based on transmission-only coherent, wide-bandwidth free-space measurements* », Cement and Concrete Composites, vol.28, N° 4, pp. 349-359, 2006.
- [11] G. Tessierault, « *Modélisation multi-fréquences du canal de propagation* », Thèse de doctorat, Université de Poitiers, décembre 2008.