



**HAL**  
open science

# Analyse et amélioration des performances du lien optique dans un système Radio-sur-Fibre

Hexin Liu, Daniel Bourreau, Camilla Kärnfelt, Frédéric Lucarz

► **To cite this version:**

Hexin Liu, Daniel Bourreau, Camilla Kärnfelt, Frédéric Lucarz. Analyse et amélioration des performances du lien optique dans un système Radio-sur-Fibre. JNM 2013: 18èmes Journées Nationales Microondes, May 2013, Paris, France. hal-00845132

**HAL Id: hal-00845132**

**<https://hal.science/hal-00845132v1>**

Submitted on 3 Jun 2024

**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 et amélioration des performances du lien optique dans un système Radio-sur-Fibre

Hexin LIU<sup>1</sup>, Daniel BOURREAU<sup>1</sup>, Camilla KÄRNFELT<sup>1</sup>, Frédéric LUCARZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpt. Micro-Ondes, TELECOM Bretagne, Technopôle Brest-Iroise, F-29280, Brest

<sup>2</sup> Dpt. Optique, TELECOM Bretagne, Technopôle Brest-Iroise, F-29280, Brest  
daniel.bourreau@telecom-bretagne.eu

**Résumé :** Un lien optique d'un système radio-sur-fibre est étudié pour la transmission de signaux Wi-Fi selon le standard IEEE 802.11g OFDM à 2.4 GHz, le lien optique étant réalisé par modulation directe d'une source laser suivie d'une photo-détection. Après avoir analysés les principaux paramètres RF du lien optique en termes de gain, bruit et non-linéarité, ses performances ont été évaluées, mettant en évidence une limitation due aux composants opto-électroniques. Une amélioration de ces performances peut être obtenue en adaptant la dynamique du lien optique à celle du lien radio. Une solution consiste à réduire le bruit (RIN) de la source laser utilisée (VCSEL) et s'affranchir d'un faible IIP3 imposé par l'amplificateur trans-impédance du photo-détecteur (PIN).

### 1. Introduction

La densification des réseaux d'accès sans fil et mobiles est devenue un enjeu majeur pour le développement des villes numériques où les besoins en capacité et en mobilité sont sans cesse croissants. L'utilisation des techniques de transmission hybrides dites « Radio-sur-Fibre » (RoF : Radio-over-Fibre) pour assurer la distribution d'une large gamme de signaux RF (Wi-Fi, LTE-4G, WiMAX) constitue une approche prometteuse [1] pour développer des infrastructures pérennes, évolutives à moindre coût et capables de transporter des flux de données à très hauts débits (>1 Gbit/s). Ces techniques bénéficient [2] des avantages intrinsèques des transmissions par fibre optique, tels que de faibles pertes, de larges bandes passantes, des coûts et une consommation électrique réduits ainsi qu'une immunité aux interférences RF. Toutefois, ces techniques souffrent d'un certain nombre de limitations liées au caractère analogique de la transmission (non linéarités et bruits) auxquelles il convient d'apporter des solutions.

Nous analysons dans cet article les performances d'un système RF-sur-Fibre adapté à transmettre par voie optique des signaux Wi-Fi selon le standard IEEE 802.11g OFDM à 2.4 GHz. Pour cela, la technique IM-DD (Intensity Modulation – Direct Detection) est mise en œuvre sur le lien optique avec des composants commercialement disponibles. Les conversions électro-optique et opto-électronique sont réalisées

respectivement par un laser VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 10Gbps à 850 nm (TOSA [3]) et par une photodiode GaAs PIN intégrant un amplificateur trans-impédance TIA (ROSA [3]).

La section 2 traite de l'analyse des paramètres RF de ce lien optique, tels que le gain, le facteur de bruit (NF) et le point d'interception d'ordre 3 (IP3). Compte tenu de ces paramètres RF, les performances du système RoF sont évaluées en termes d'EVM (Error Vector Magnitude), de rapport signal à bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) et de dynamique (DR : Dynamic Range) dans les sens montant et descendant. Les principaux résultats de performance sont présentés dans la section 3. Enfin, la section 4 décrit une limitation du système RoF liée à l'optique et propose des solutions pour améliorer ses performances.

### 2. Caractéristiques RF du lien optique IM-DD

Le gain du lien optique IM-DD est donné par [4] :

$$g_{opt\_link} = (\eta_{Tx} \times \eta_{Rx} \times t_{fo})^2 \times g_{TIA} \times \frac{R_{out}}{R_{in}} \quad (1)$$

où  $\eta_{Tx}$  représente l'efficacité du laser (réseau d'adaptation inclus),  $\eta_{Rx}$  représente la responsivité du photo-détecteur,  $t_{fo}$  représente la perte lumineuse dans la fibre optique,  $g_{TIA}$  représente le gain RF du TIA,  $R_{out}/R_{in}$  est considéré comme égal à 1 pour l'adaptation entrée/sortie.

Afin de simplifier le calcul, nous négligeons la perte dans la fibre optique. Le facteur de bruit du lien total s'écrit sous la forme:

$$nf_{opt\_link} = 2 + \frac{1}{g_{no\_TIA}} + \frac{(P_{in,opt}^2 RIN/R_L + 2qP_{in,opt}\eta_{RX} + \bar{i}_{TIA}^2)R_{load}}{g_{no\_TIA}kT} \quad (2)$$

où  $g_{no\_TIA}$  représente le gain,  $RIN$  représente le bruit de type RIN (Relative Intensity Noise) du laser,  $P_{in,opt}$  représente la puissance (intensité) optique émise par le laser, ce qui peut être exprimée par le courant de polarisation et le courant de seuil du laser,  $R_L$  représente l'impédance de sortie du laser,  $\bar{i}_{TIA}$  représente la densité de bruit du TIA (typiquement 8 ~ 12 pA/ $\sqrt{Hz}$ ).

Il est évident que le facteur de bruit minimum est de 2 dB, ce qui rend bien compte du résultat dans [5]-[6].

D'après (1), nous pouvons déduire que le facteur de bruit du lien est essentiellement déterminé par le laser : pour un courant de polarisation de niveau faible, le RIN du laser est dominant.

L'OIP3 (Output IP3) du lien optique s'écrit sous la forme :

$$oip_{3,opt\_link} = \left( \frac{1}{oip_{3,no\_TIA} \times g_{TIA}} + \frac{1}{oip_{3,TIA}} \right)^{-1} \quad (3)$$

Le gain RF du TIA est très important. Pour le ROSA, il est d'environ 27 dB calculé à partir de (1). Si l'OIP3 du laser est suffisamment élevé (i.e.: > 0 dBm), l'OIP3 du lien total est déterminé par le TIA.

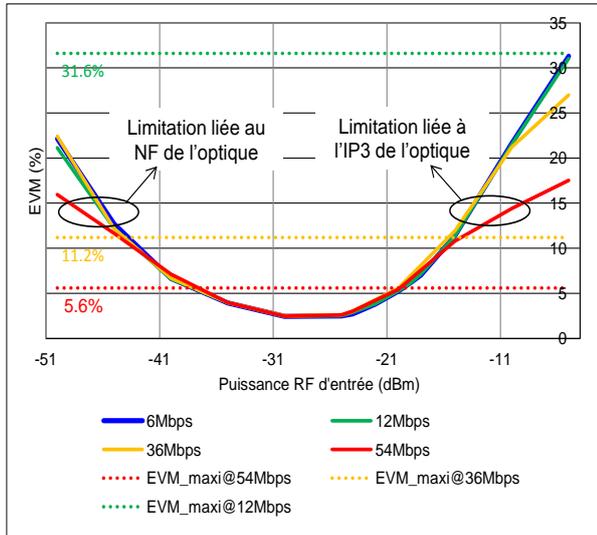
A partir de (1), (2) et (3), nous pouvons déduire le gain, le NF et l'IP3 (Input IP3) du lien TOSA/ROSA. Les résultats de calcul et de mesure concordent, comme le montre le **Tableau 1**.

	Gain(dB)	NF(dB)	OIP3(dBm)	IIP3(dBm)
Calcul	-1.7	39.2	-7.0	-5.3
Mesure	-1.6	37.1	-6.8	-5.2

**Tableau 1. - Paramètres RF calculés et mesurés pour le lien TOSA/ROSA**

### 3. Performances du lien optique IM-DD

D'abord, nous avons mesuré l'EVM du lien TOSA/ROSA dans le sens descendant pour un signal Wi-Fi selon la norme IEEE 802.11g OFDM à 2.4 GHz avec différents débits/modulations [7]: 6 Mbps, 12 Mbps, 36 Mbps et 54 Mbps.



**Figure 1. - EVM mesuré avec différents débits du signal IEEE 802.11g OFDM**

Débit (Mbps)	Modulation/codage	Seuil d'EVM(%)
6	BPSK, taux de codage : 1/2	56.2
12	QPSK, taux de codage : 1/2	31.6
36	16-QAM, taux de codage : 3/4	11.2
54	64-QAM, taux de codage : 3/4	5.6

**Tableau 2. - Seuils d'EVM pour IEEE 802.11a/g**

La **Figure 1** représente l'EVM en fonction de la puissance du signal RF fourni à l'entrée du lien optique.

La pente de la courbe d'EVM à ses deux extrémités est déterminée par la méthode de modulation/codage appliquée. En général, plus la modulation est complexe et/ou plus le taux de codage est fort, plus la pente est abrupte. L'EVM minimum est d'environ 2%. Pour des signaux RF aux faibles niveaux, c'est le NF du lien optique qui limite l'EVM ; pour des fortes puissances RF, c'est l'IIP3 de l'optique qui est pénalisant.

La **Figure 1** renseigne également sur la dynamique du lien optique descendant. Par exemple, pour un débit de 54 Mbps, l'EVM est inférieur à 5.6% lorsque la puissance RF d'entrée est comprise entre -37 dBm et -20 dBm, et dans ce cas, la dynamique du lien descendant atteint 17 dB.

Pour le système RoF IEEE 802.11g OFDM à 2.4 GHz, c'est le récepteur qui est essentiellement limité par l'optique. Dans le sens montant, le standard IEEE 802.11a/g ne définit aucun seuil d'EVM. Autrement dit, il est impossible d'analyser numériquement la dynamique (DR) du lien montant à partir de l'EVM. Cependant, la dynamique permet toujours d'indiquer qualitativement la performance du lien montant.

Mathématiquement, la DR du lien montant est définie par la différence entre la sensibilité maximale et celle minimale du récepteur.

$$DR = (IIP_3 - margin_{ip3}) - (EIN + SNR_{min} + margin_{SNR}) \\ = (IIP_3 - margin_{ip3}) - (-174dBm/Hz + 10\log(Bw)) \quad (4) \\ - (NF_{opt} + SNR_{min} + margin_{SNR})$$

où EIN est le bruit équivalent d'entrée,  $margin_{ip3}$  vaut typiquement 22 dB (12~15 dB pour le point de compression à 1dB, et 7~10 dB compte tenu du PAR (Peak-to-Average Power Ratio) du signal 802.11a/g OFDM),  $margin_{SNR}$  vaut 0 dB,  $Bw$  représente la bande passante de 20 MHz du signal Wi-Fi,  $SNR_{min}$  est défini par [7] pour différents débits.

Débit	6Mbps	12Mbps	36Mbps	54Mbps
DR optique (montant)	28dB	25dB	17dB	15dB

**Tableau 3. - Dynamique calculée du lien TOSA/ROSA dans le sens montant pour différents débits du signal Wi-Fi selon IEEE 802.11g OFDM**

En comparaison avec la dynamique RF du standard IEEE 802.11a/g (35 dB pour 54 Mbps, 40 dB pour 36 Mbps, 49 dB pour 12 Mbps et 52 dB pour 6 Mbps), la faible dynamique (DR) du lien optique ne permet pas de s'adapter au besoin du SNR.

### 4. Amélioration de la performance du récepteur RoF

Une solution pour améliorer la dynamique (DR) du lien montant consiste à mettre en œuvre un mécanisme de CAG (Contrôle Automatique du Gain) dans le RAU (Remote Antenna Unit). Nous avons développé et testé une boucle à CAG analogique (demande de brevet No: FR1260845), que nous avons incorporé au lien montant pour analyser la dynamique. La **Figure 2** illustre trois

différentes configurations testées pour le lien montant. Dans une première configuration, le lien comprend un laser et une photodiode reliés par une fibre optique ainsi qu'un amplificateur à trans-impédance (TIA) en sortie de la photodiode. Dans une deuxième configuration, un amplificateur à faible bruit (LNA) est inséré à l'entrée du laser. Dans une troisième configuration, un module d'amplification à contrôle automatique de gain (CAG) remplace le LNA de la configuration 2.

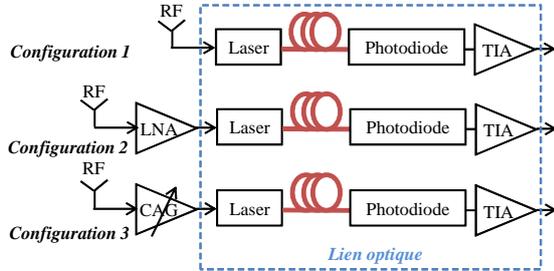


Figure 2. – Trois configurations du lien montant

La Figure 4 montre l'EVM tel que mesuré pour ces trois configurations du lien montant. Le débit appliqué est de 36 Mbps.

- Avec la deuxième configuration, on constate que la courbe de l'EVM est translatée vers la gauche (d'une valeur de 26 dB correspondant au gain du LNA) avec un maintien de la dynamique (DR).
- Avec la troisième configuration, on constate que seule la partie gauche de la courbe de l'EVM est déplacée (d'environ 16 dB correspondant au gain maximum de la boucle à CAG), le côté droit de la courbe étant maintenu à cause de la limitation liée à l'IIP3 de la boucle à CAG. Il s'en suit que la dynamique (DR) est améliorée.

Une autre solution pour accroître la dynamique (DR) consiste à améliorer les paramètres RF des composants optoélectroniques.

D'après (4), la dynamique (DR) du lien optique est limitée par le NF et l'IIP3. Le NF peut être amélioré selon certaines approches de réduction du RIN [8]-[9]. En outre, il faut choisir un laser à faible puissance optique qui détermine le NF (cf. (2)).

L'IIP3 du lien optique est essentiellement limité par le TIA. A priori, l'IIP3 du photo-détecteur n'est pas mauvais. En négligeant la non-linéarité du photo-détecteur, l'OIP3 peut être exprimé comme :

$$oip_{3,pd} = 4(i_d)^2 R_{load} \quad (5)$$

Dans le meilleur des cas, l'IIP3 du photo-détecteur peut être égalé à l'OIP3 du laser :

$$iip_{3,pd, highest} = oip_{3,laser} \quad (6)$$

Le point de compression à 1dB du photo-détecteur du ROSA (sans TIA) est d'environ -12 dBm. A partir de (5), on en déduit que l'OIP3 du photo-détecteur est de -7 dBm.

Comme discuté dans la section 2, l'OIP3 du TIA peut être considéré identique à l'OIP3 du lien optique total (-6.8 dBm par mesure). Autrement dit, l'OIP3 du photo-détecteur est maintenu par le TIA. En conséquence, (3) s'écrit sous la forme suivante :

$$oip_{3,opt\_link} = oip_{3,TIA} \left/ \left( 1 + \frac{1}{g_{TIA}} \right) \right. \quad (7)$$

Le gain RF du TIA peut être déduit à partir de la Figure 3 :

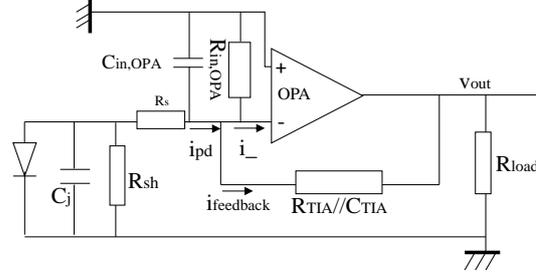


Figure 3. - Structure du TIA

Si l'amplificateur opérationnel (OPA) est idéal, le courant  $i_- = 0$  mA.

$$i_{pd} = i_{feedback} = -v_{out} / R_{TIA} \quad (8)$$

La résistance de contre-réaction  $R_{TIA}$  est typiquement de quelques kΩ. Elle est exprimée par l'efficacité de conversion  $T_{eff}$  du ROSA (d'environ 3000 V/W). Ainsi, le gain RF du TIA s'exprime comme suit :

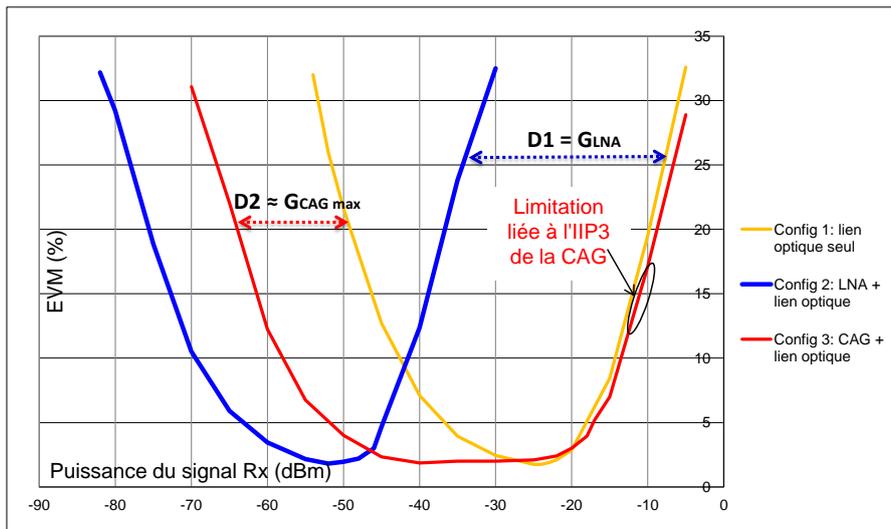
$$g_{TIA} = T_{eff}^2 / R_{load} \times (\eta_{Rx}^2 \times R_{in,OPA}) \quad (9)$$

où  $R_{in,OPA}$  représente la résistance d'entrée de l'OPA, typiquement quelques kΩ.

A partir de (5), (7) et (9), nous pouvons déduire les paramètres RF des composants optoélectroniques et du lien total, comme montré dans le Tableau 4.

	Gain(dB)	NF(dB)	OIP3(dBm)	IIP3(dBm)
VCSEL	-22.5	38.9	10.0	32.5
Fibre	0	0	+∞	+∞
Photo-détecteur	-6.0	4.8	-7.0	-1.0
TIA	26.8	1.0	-7.0	-33.8
Lien opt (avec TIA)	-1.7	39.2	-7.0	-5.3
Lien opt (sans TIA)	-28.5	39.2	-7.3	21.2

Tableau 4. - Paramètres RF calculés pour des composants optoélectroniques et des liens optiques (avec ou sans TIA)



#### Caractérisation des composants utilisés

##### LNA: Mini-Circuits ZVA213+

Mesuré à 2.45 GHz:

Gain = 26.5 dB,

NF = 4.1 dB

##### CAG :

VGA (Variable Gain Amplifier):

Hittite HMC287ms8

Détecteur : Analog Devices

AD8362

Mesuré à 2.45 GHz:

-12 dB ≤ Gain ≤ 16 dB

2.8 dB ≤ NF ≤ 8.9 dB

IIP3 = -6 dBm

Figure 4. - EVM mesuré pour différentes configurations du lien montant

L'OIP3 reste constant (environ -7 dBm) pour le lien optique sans TIA. L'IIP3 est largement amélioré par rapport au celui du lien TOSA/ROSA avec TIA, le  $\text{Gain}_{\text{IIP3}} = 26.5$  dB.

Par la suite, il pourra être avantageux de remplacer le TIA par un amplificateur RF linéaire dont l'IP3 est plus élevé (avec une consommation plus importante). Pour une liaison RoF analogique, il sera beaucoup plus avantageux de placer des LNA avant la chaîne optique pour optimiser la dynamique (DR), ces LNA diminueront le NF total pour respecter la dynamique radio.

## 5. Conclusion et perspectives

Nous avons présenté une limitation du système RoF liée à l'optique. Pour des applications à faibles sensibilités, la dynamique (DR) de la chaîne totale devra être suffisamment étendue afin de s'adapter aux contraintes de SNR. Dans ce contexte, nous proposons de :

- remplacer le TIA (en sortie du photo-détecteur) par un post-amplificateur RF ou un préamplificateur à faible bruit LNA.
- utiliser la boucle à CAG pour ajuster la dynamique (DR) radio.

Ne disposant que d'un photo-détecteur avec TIA, les solutions proposées ci-dessus n'ont pas pu être réalisées physiquement à ce jour. Toutefois, une chaîne optique sans amplificateur TIA sera prochainement réalisée et caractérisée dans nos laboratoires.

**Remerciements :** Les auteurs remercient l'Institut Carnot pour avoir financé ces travaux de thèse et l'équipe de la plateforme CapiR<sup>TM</sup> pour son soutien logistique et ses contributions.

## 6. Bibliographie

- [1] D. Wake, M. Webster, G. Wimpenny, K. Beacham and L. Crawford, « *Radio over fiber for mobile communications* », Microwave Photonics, 2004. MWP'04. 2004 IEEE International Topical Meeting. 4-6 Oct. 2004.
- [2] J. Capmany and D. Novak, « *Microwave photonics combines two worlds* », Nature photonics, vol.1, pp. 319 – 329, Sep. 2007.
- [3] Finisar HFE6x92-x61: 850nm-TOSA/ROSA-LC/SC, [www.finisar.com/products/optical-components/VCSEL-and-Detectors/HFE6x92-x61](http://www.finisar.com/products/optical-components/VCSEL-and-Detectors/HFE6x92-x61), (last consulted on March 18, 2013).
- [4] C.H. Cox, « *Gain and noise figure in analogue fibre-optic links* », Optoelectronics, IEE Proceedings J, vol. 139, Issue: 4, pp. 238-242, Aug. 1992.
- [5] C.H. Cox, G.E. Betts and L.M. Johnson, « *An Analytic and Experimental Comparison of direct and External Modulation in Analog Fiber-Optic Links* », IEEE Transaction on microwave theory and techniques, vol. 38, No. 5, May. 1990.
- [6] Michael Sauer, Andrey Kobayakov and Jacob George, « *Radio Over Fiber for Picocellular Network Architectures* », Journal of Lightwave Technology, Vol. 25, No. 11, November 2007.
- [7] IEEE 802.11 standard, « *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications* ». IEEE Std. 802.11 – 2007, 12 June 2007.
- [8] A. Madjar, « *A balanced fiber optic communication link featuring laser RIN cancellation* », Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, vol.2, 563 – 566, 1992.
- [9] J.-R. Burie, G. Beuchet, « *Ultra high power, Ultra low RIN up to 20 GHz 1.55 μm DFB AlGaInAsP Laser for analog applications* », Novel in-plane semiconductor lasers, vol. 7616, No. 09, 2010.