

# Performances du contrôle d'erreur d'une transmission optique sans fil dédiée à une application de télé-surveillance mobile

Nicolas BARBOT<sup>1,2</sup>, Stéphanie SAHUGUEDE<sup>1,2</sup>, Anne JULIEN-VERGONJANNE<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>XLIM DPT-C2S2 UMR CNRS 7252/ ENSIL 16 rue d'Atlantis, 87068 LIMOGES, FRANCE

<sup>2</sup>Labex Sigma-Lim, Université de Limoges

{nicolas.barbot, sahuguede, anne}@ensil.unilim.fr

**Résumé** – Nous explorons les performances d'un système de communication optique sans fil sous contrainte de mobilité en considérant l'impact du contrôle d'erreur à différents niveaux (physique et application). L'application visée concerne la transmission à distance de données médicales d'un patient vers une station de collecte. L'évaluation des performances inclut la prise en compte d'un code correcteur d'erreur dans la couche physique ainsi qu'un mécanisme de contrôle d'erreur de type ARQ ou basé sur les codes LT. Pour cela, la capacité avec blocage du canal optique sans fil mobile est utilisée pour quantifier l'écart entre la borne théorique et la performance du système réel. Les performances de la transmission optique sans fil sont évaluées en prenant en compte la mobilité, le rendement du code correcteur de la couche physique ainsi que le mécanisme de contrôle d'erreur. L'étude montre que le codage LT permet de réduire la puissance d'émission pour le débit correspondant à l'application et ainsi augmente l'efficacité énergétique.

**Abstract** – We explore the performance of a mobile wireless optical system in indoor environment by considering forward error correction in the physical layer and error control mechanisms in the upper layer. The study deals with medical data transmission between a mobile emitter and a fixed receiver. Performance evaluation includes LDPC code in the physical layer and erasure recovery such as ARQ and LT codes in the upper one. Results are compared to outage capacity of the mobile wireless optical channel which is the theoretical bound. This permits optimizing the code rate in the physical layer in order to maximize the effective data rate in the application one. We show that the use of LT codes allows reducing the optical emitted power for the effective rate needed by the application.

## 1 Introduction

Les communications optiques sans fil offrent une alternative aux transmissions classiques utilisant les radio-fréquences (RF) [1]. En effet, la technologie optique sans fil permet de bénéficier d'une bande de fréquence illimitée, sans licence et ne produit pas d'interférences avec les installations RF déjà existantes [2]. De plus, les systèmes optiques sans fil présentent une complexité et un coût plus faibles que leurs équivalents RF [1]. Cette technologie peut donc être déployée dans les lieux où l'utilisation des ondes RF est limitée tels que les hôpitaux pour des applications de télé-surveillance. Il s'agit alors de transmettre via un émetteur optique des informations médicales produites par des capteurs portés par un patient vers un récepteur de collecte situé dans l'environnement. Le débit nécessaire à ce type d'application est généralement d'environ 500 kb/s.

En optique sans fil, deux types de transmission sont classiquement distingués, les transmissions basées sur un lien direct (Line of Sight LOS) et les transmissions diffuses [3]. Les liaisons LOS sont caractérisées par de forts Rapports Signal sur Bruit (RSB) mais sont extrêmement sensibles aux variations de position et d'orientation des émetteurs et récepteurs [4]. Au contraire, les liens diffus utilisent la réflexion des ondes optiques sur les surfaces de l'environnement pour maintenir une liaison entre l'émetteur et le récepteur et sont par conséquent plus robustes au prix d'une puissance reçue plus faible [5].

Dans l'application étudiée, le patient surveillé est équipé de capteurs couplés à un émetteur optique. On suppose qu'il est

mobile dans un environnement donné et que le récepteur est fixe, positionné au centre du plafond. Dans cette configuration, on s'intéresse uniquement à une transmission diffuse, plus adaptée à la contrainte de mobilité qu'une transmission LOS.

De plus, du fait de la mobilité, le canal optique sans fil est non-stationnaire. La puissance reçue dépendant de la position de l'émetteur dans la pièce, ses variations peuvent être considérées comme lentes devant le débit de la transmission (les évanouissements multi-trajets sont négligés car en optique la taille des détecteurs est très supérieure à la longueur d'onde). Généralement, les transmissions sur ce type de canal emploient des techniques de retransmission automatique (Automatic Repeat reQuest ARQ) hybrides combinant un code correcteur d'erreur dans la couche physique ainsi qu'un mécanisme de contrôle d'erreur pour parvenir à transférer une information de manière fiable quel que soit l'état du canal [6]. Ainsi, lors de la réception d'une trame, l'algorithme de décodage décode le mot reçu. Si l'algorithme retrouve le bon mot de code, la trame est transmise à la couche supérieure. Dans le cas contraire, la trame est jetée et le mécanisme ARQ demandera la retransmission de la trame. D'autres approches [7], plus récentes, ont proposé de remplacer le mécanisme d'ARQ par un code fontaine en utilisant des codes LT (Luby Transform).

Ce papier explore les performances du canal optique sans fil mobile en considérant le code correcteur d'erreur dans la couche physique (LDPC Low Density Parity Check) et deux types de mécanismes de contrôle d'erreur : ARQ et LT. Après avoir présenté le système optique étudié dans la partie 2, l'ar-

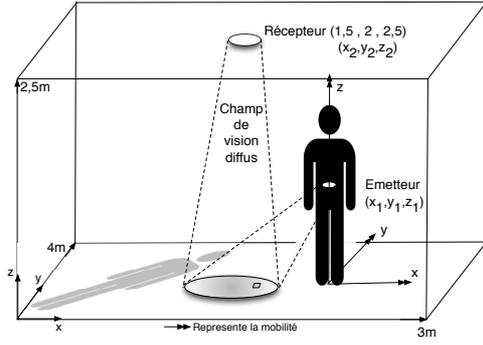


FIGURE 1 – Configuration indoor

ticle traite dans la partie 3, des performances au niveau de la couche physique et les compare à la probabilité de blocage de la liaison. La partie 4 explore la performance en terme de débit atteignable obtenue par un mécanisme de type ARQ ou par un codage LT. Enfin, le rendement du code de la couche physique est optimisé dans le but de réduire la puissance optique émise tout en assurant un débit nécessaire à l'application médicale.

## 2 Présentation du système

On considère qu'un émetteur infrarouge placé sur un patient transmet des données en utilisant la modulation OOK (On-Off Keying) vers une station de collecte située au plafond d'une chambre d'hôpital supposée vide, de dimension 3x4x2.5 m. La configuration étudiée est présentée sur la figure 1. En réception, la photo-diode convertit le signal optique reçu en signal électrique  $y = RHx + n$  où  $R$  est la sensibilité de la photo-diode,  $H$  le gain statique du canal,  $x \in \{0, 2P_t\}$  le signal transmis et  $n$  représente un bruit additif blanc gaussien.  $P_t$  représente la puissance optique moyenne émise. De plus en optique, le RSB est proportionnel au carré de la puissance reçue et s'exprime par [1] :

$$RSB = \frac{2P_t^2 R^2 H^2}{R_b N_0} \quad (1)$$

où  $R_b$  et  $N_0$  représentent respectivement le débit de la transmission et la densité spectrale de puissance du bruit.

Dans cette étude, on ne considère pas l'impact du corps du patient. L'émetteur est positionné à un endroit du corps défini par les coordonnées  $(x_1, y_1, z_1)$ . Le récepteur fixe est placé au centre du plafond en  $x_2 = 1.5$  m,  $y_2 = 2$  m,  $z_2 = 2.5$  m. La transmission entre l'émetteur et le récepteur s'effectue par réflexion diffuse qui peut être modélisée par un modèle simple considérant une seule réflexion sur une paroi (le sol dans notre cas). L'atténuation de la propagation diffuse peut alors être décrite par le modèle appelé *ceiling bounce* [8] et vaut :

$$H_d = \frac{\rho_t A z_1^2 z_2^2}{\pi^2} \times \iint_{sol} \frac{dxdy}{(z_1^2 + (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2)^2 (z_2^2 + (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2)^2} \quad (2)$$

où  $\rho$  correspond à la réflectivité du sol égale à 0.8 dans notre étude et  $A$  la surface physique du photo-récepteur (1 cm<sup>2</sup>).

L'émetteur est placé sur le patient mobile à l'intérieur de la pièce. Comme la pièce est vide, il peut donc se déplacer tout au

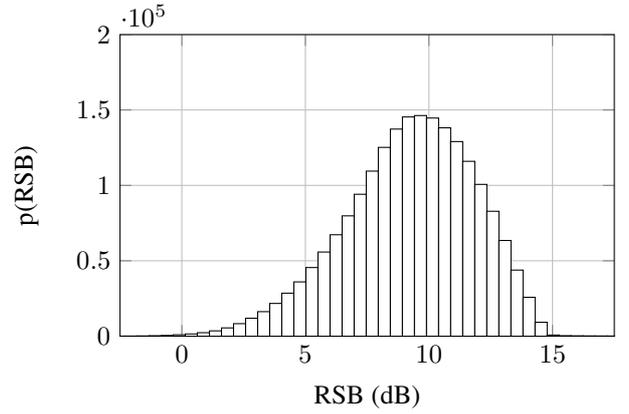


FIGURE 2 – Distribution du RSB reçu sur le canal optique sans fil mobile

long de l'axe  $x$  et  $y$ . On suppose que la mobilité en  $z$  est limitée entre 0 et 1.5 m ce qui pourrait correspondre à un émetteur à la ceinture. De plus, la mobilité du patient est modélisée à l'aide d'un modèle de type *random waypoint* qui définit la densité de probabilité des positions du patient dans la pièce par [9] :

$$f_{XYZ}(x, y, z) = \left( \frac{6x}{x_m^2} - \frac{6x^2}{x_m^3} \right) \left( \frac{6y}{y_m^2} - \frac{6y^2}{y_m^3} \right) \left( \frac{6z}{z_m^2} - \frac{6z^2}{z_m^3} \right) \quad (3)$$

Les variations des positions du patient dans la pièce entraînent des variations du RSB reçu. La figure 2 présente la distribution du RSB obtenu en utilisant la méthode de Monte Carlo, pour une puissance  $P_t$  de 10 mW et un débit de 500 kb/s.

On peut remarquer que la variance de la distribution est élevée et que le RSB varie de 0 à 15 dB suivant la position de l'émetteur dans la pièce. Pour maintenir une performance acceptable quelle que soit la position, un moyen classique consiste à utiliser un code correcteur d'erreur dans la couche physique. Nous étudions par la suite, la probabilité de blocage ainsi que les performances des codes LDPC.

## 3 Performance des codes LDPC sur le canal optique

Du fait de la non stationarité du canal optique, le récepteur expérimente des phénomènes de blocage. Ces phénomènes de blocage sont provoqués quand la capacité du canal optique est inférieure au débit utilisé par l'émetteur :

$$P_{out} = \Pr[C(RSB) < r] = \Pr[RSB < RSB_0] \quad (4)$$

La probabilité de blocage  $P_{out}$  estime ainsi les performances de la liaison en considérant un code correcteur d'erreur optimal dans la couche physique. Cependant, les codes correcteur d'erreur réels peuvent expérimenter des blocages même si la capacité du canal est supérieure à leur rendement  $r$ .

Le dimensionnement d'un code LDPC sur un canal non stationnaire est une tâche complexe car une redondance trop élevée entraînera une diminution du débit lorsque le canal présente un bon RSB et une redondance trop faible entraînera une probabilité de blocage du décodeur trop élevée. La probabilité de blocage est estimée en calculant la probabilité que le décodeur converge vers le bon mot de code pour une distribution de RSB

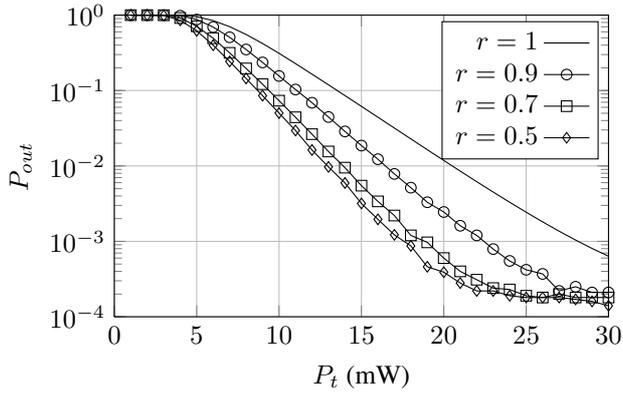


FIGURE 3 – Performance des codes LDPC sur le canal optique sans fil mobile

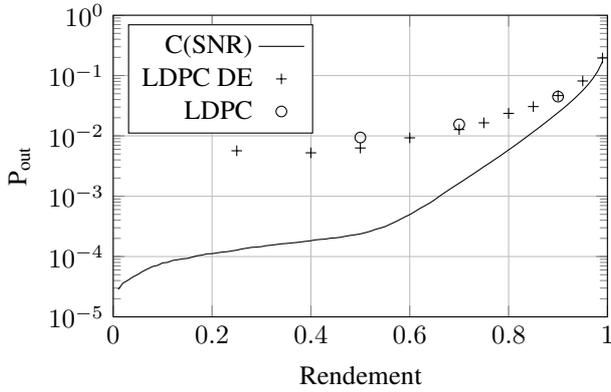


FIGURE 4 – Performance des codes LDPC sur le canal optique sans fil mobile

donnée (engendrée par la mobilité du patient). La figure 3 présente la performance en termes de probabilité de blocage de codes LDPC réguliers de longueur  $N = 100$  bits et de rendements  $r$  en fonction de la puissance optique émise  $P_t$  pour un débit de 500 kb/s. On peut voir que l'utilisation d'un code LDPC permet de diminuer  $P_{out}$  pour une puissance supérieure à 5 mW environ. De plus, on constate que  $P_{out}$  diminue lorsque la puissance augmente ou que  $r$  diminue (au prix d'une diminution du débit utile). De plus, la présence d'un plancher d'erreur montre que le code correcteur d'erreur seul, ne permet pas de fiabiliser une transmission sur le canal optique mobile (et cela quel que soit le rendement du code).

La figure 4 présente la performance des codes LDPC en terme de  $P_{out}$  en fonction du rendement. On a également reporté une approximation obtenue avec Density Evolution (DE), pour une puissance de 12 mW et un débit de 1 Mb/s ainsi que la borne théorique obtenue avec (4). On peut remarquer que les codes LDPC de faible rendement présentent des probabilités de blocage plus faibles que ceux de rendement élevé. Cependant, leur efficacité par rapport à la borne est plus faible. Ainsi dans le but d'augmenter l'efficacité énergétique de la liaison, il est préférable d'augmenter le rendement du code dans la couche physique, et par conséquent, d'augmenter la probabilité de blocage dans la couche application (donc le nombre de paquets perdus au niveau de la couche application).

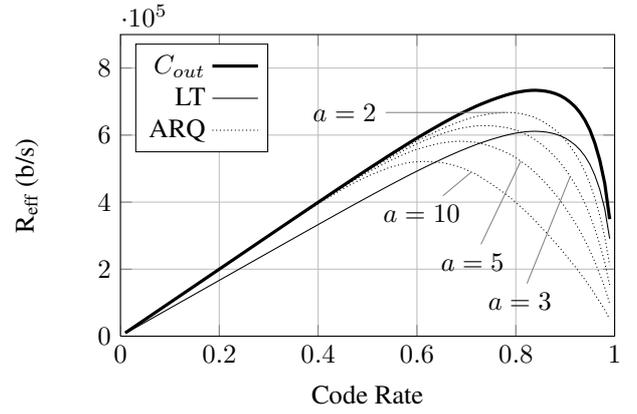


FIGURE 5 – Débit atteignables en fonction de la puissance d'émission

## 4 Performance du codage LT

Dans la couche application, le canal résultant, situé au-dessus de la couche physique, peut être modélisé par un canal à effacement qui transmet  $r$  bit d'information par utilisation du canal avec une probabilité  $1 - P_{out}$  et aucune information avec une probabilité  $P_{out}$  (paquets perdus).

Le débit maximal théorique qui peut alors être transmis en considérant l'impact de la couche physique et de la couche application, correspond à la capacité avec blocage et vaut [10] :

$$C_{out} = (1 - P_{out}(RSB_0)) C(RSB_0) \quad (5)$$

où  $C(RSB_0)$  correspond à la capacité du canal optique sans fil pour une valeur de  $RSB_0$  donnée et  $1 - P_{out}(RSB_0)$  correspond à la capacité du canal à effacement résultant.

La méthode classique permettant d'approcher cette borne consiste à employer un mécanisme ARQ pour le canal à effacement. Les performances sont cependant pénalisées par l'attente liée au mécanisme lorsque la probabilité de blocage est trop importante. Le débit moyen d'un système utilisant l'ARQ dépend de la probabilité de blocage, du rendement du code  $r$  ainsi que du rapport  $a$  entre le temps d'attente maximal de l'acquittement et le temps de transmission et peut être exprimé par (en considérant une voie de retour parfaite) :

$$R_{ARQ} = \frac{(1 - P_{out}) r}{(1 - P_{out}) + a P_{out}} \quad (6)$$

Une transmission fiable peut aussi être obtenue en utilisant un code LT à la place du mécanisme d'ARQ. Cette méthode permet de minimiser l'utilisation de la voie de retour. Un code LT nécessite  $1 + \epsilon$  utilisations du canal pour transmettre 1 bit d'information (hors effacement).  $\epsilon$  est l'overhead du code et correspond à la quantité d'information supplémentaire à envoyer. Le débit atteignable sur le canal considéré est alors de :

$$R_{LT} = \frac{1}{1 + \epsilon} (1 - P_{out}) r \quad (7)$$

Pour un code optimal de rendement  $r = C(RSB_0)$ , ce débit est égal à la capacité avec blocage au facteur  $1/(1 + \epsilon)$  près. Dans l'étude, on considère des codes LT de très courtes longueurs ( $K = 100$  paquets) dont la distribution des degrés a été optimisée en utilisant l'algorithme *differential evolution* pour obtenir  $\epsilon = 20\%$ .

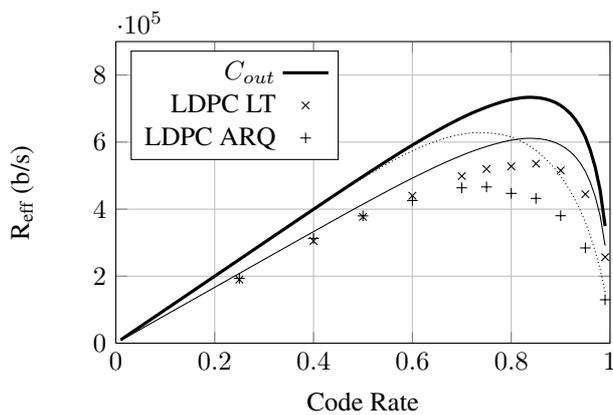


FIGURE 6 – Capacité avec blocage du canal optique

La figure 5 présente la performance d'un système optique sans fil mobile utilisant un code optimal dans la couche physique et le mécanisme ARQ ou le code LT en fonction du rendement  $r$ . On peut voir que le code LT atteint la même fraction de la capacité avec blocage quel que soit le rendement  $r$  du code. Ainsi, la capacité avec blocage et le débit en utilisant un code LT sont maximisés pour le même rendement. La performance de l'ARQ dépend de la valeur de  $a$  et décroît quand  $a$  augmente. De plus, le débit maximum en utilisant ARQ est obtenu avec des valeurs de  $r$  d'autant plus faibles que  $a$  est grand. Dans le but d'effectuer une comparaison entre ARQ et les codes LT, on choisit une valeur de  $a$  telle que les débits maximums soient identiques *i.e.*  $a = 3$ . Les rendements optimaux sont alors de 0.74 et 0.85 pour l'ARQ et le code LT respectivement.

La figure 6 présente la capacité avec blocage du canal optique mais aussi le débit atteignable par le mécanisme ARQ ( $a = 3$ ) et les codes LT mais en considérant cette fois la performance "réelle" des codes LDPC. On peut alors remarquer que la performance des codes LT est légèrement dégradée par rapport à la performance avec un codage optimal. Par contre, le débit atteignable par le mécanisme ARQ est fortement diminué comparé au cas optimal car la probabilité de blocage des codes LDPC est élevée (voir figure 4). Cette pénalité est d'autant plus importante que le rendement du code est important. L'utilisation des codes LT constitue donc un mécanisme plus efficace en terme de débit.

D'autre part, la figure 7 présente la puissance minimale requise dans le but d'assurer un débit effectif de 500 kb/s. On peut voir que le codage LT permet de diminuer la puissance optique nécessaire de 3 mW pour un code de rendement 0.9 comparé à une solution identique utilisant ARQ. Ainsi, le codage LT permet d'augmenter l'efficacité énergétique et d'améliorer l'autonomie du système.

## 5 Conclusion

Dans cet article, nous avons évalué les performances d'une liaison optique sans fil avec mobilité en considérant l'impact d'un code LDPC dans la couche physique ainsi qu'un code LT dans la couche application. Pour cette configuration particulière, on a montré qu'il était plus efficace de dimensionner un code LDPC produisant une probabilité de blocage élevée traitée

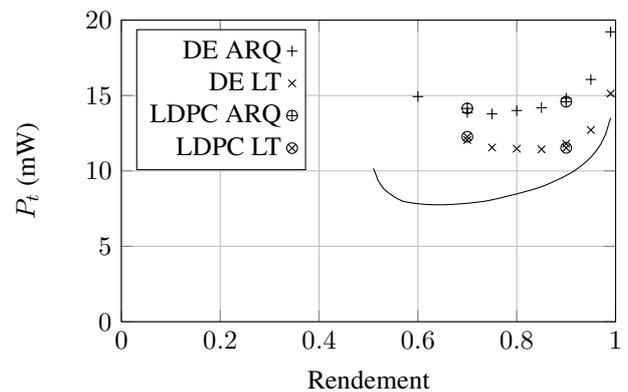


FIGURE 7 – Minimisation de la puissance émise

tée par les mécanismes de contrôle d'erreur. Nous avons également souligné que le codage LT est plus efficace en terme de débit et permet de réduire la puissance d'émission comparé aux techniques classiques utilisant l'ARQ hybride ce qui est un avantage pour une application de télé-surveillance où l'émetteur est mobile.

## Références

- [1] J. Kahn and J. Barry, "Wireless infrared communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997.
- [2] Z. Ghassemlooy and A. Hayes, "Indoor optical wireless communications systems—part i : Review," *School of Engineering, Northumbria University*, 2003.
- [3] F. Gfeller and U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474–1486, 1979.
- [4] D. O'Brien, M. Katz, P. Wang, K. Kalliojarvi, S. Arnon, M. Matsumoto, R. Green, and S. Jivkova, "Short-range optical wireless communications," in *Wireless world research forum*, 2005, pp. 1–22.
- [5] S. Hranilovic, *Wireless optical communication systems*. Springer, 2004.
- [6] S. Lin, D. Costello, and M. Miller, "Automatic-repeat-request error-control schemes," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 22, no. 12, pp. 5–17, 1984.
- [7] M. Luby, "Lt codes," in *Foundations of Computer Science, 2002. Proceedings. The 43rd Annual IEEE Symposium on*. IEEE, 2002, pp. 271–280.
- [8] J. Carruthers and J. Kahn, "Modeling of nondirected wireless infrared channels," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 10, pp. 1260–1268, 1997.
- [9] C. Bettstetter, G. Resta, and P. Santi, "The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 2, no. 3, pp. 257–269, 2003.
- [10] A. Goldsmith, *Wireless communications*. Cambridge university press, 2005.